



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY**

**A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY**

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

**MODEL PRŮMYSLOVÉHO ROBOTICKÉHO RAMENE**

INDUSTRIAL ROBOTIC ARM MODEL

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. David Sobota**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Petr Vyroubal, Ph.D.**

**BRNO 2018**

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Mikroelektronika**

Ústav mikroelektroniky

**Student:** Bc. David Sobota

**ID:** 154921

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2017/18

**NÁZEV TÉMATU:**

## Model průmyslového robotického ramene

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Nastudujte problematiku řízení robotických manipulátorů a seznámte se s pojmy jako Průmysl 4.0 a chytrá továrna. Vyberte vhodnou konstrukci robotického ramene pro realizaci pomocí 3D tisku. Vytvořete jeho zjednodušené virtuální dvojče pro výrobu. Navrhněte řídicí a senzorický systém pro řízení vybraného manipulátoru pro výukové účely.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 5.2.2018

**Termín odevzdání:** 22.5.2018

**Vedoucí práce:** Ing. Petr Vyroubal, Ph.D.

**Konzultant:**

**doc. Ing. Lukáš Fojcik, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Práce se zabývá problematikou průmyslových robotických ramen, jejich konstrukcí, řízením i rolí v konceptu Průmysl 4.0. Popisuje proces vývoje a následné realizace modelu průmyslového ramene pomocí technologie 3D tisku. Kromě vlastního modelu je v práci řešen i firmware, software a inverzní kinematika potřebná k ovládání. Realizovaný model robotického ramene bude následně využíván jako učební pomůcka.

## **Klíčová slova**

Robotika, Průmysl 4.0, kinematika, programování, 3D tisk.

## **Abstract**

This work deals with problematics of industrial robotic arms, with their constructions, controlling and with their role in Industry 4.0. Work describes the process of development and realization of the industrial robotic arm model by 3D printing. Besides construction of model, work deals with firmware, software and inversion kinematics crucial to controlling. Model of robotic arm will be used as learning tool.

## **Keywords**

Robotics, Industry 4.0, kinematics, programming, 3D print.

### **Bibliografická citace:**

SOBOTA, D. *Model průmyslového robotického ramene*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 66 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Vyroubal, Ph.D..



## **Prohlášení**

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Model průmyslového robotického ramene jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **22. května 2018**

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Vyroubalovi, Ph.D. za zajímavé téma, za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce a také za poskytnutí zázemí a materiálu pro výrobu komponent. Dále děkuji také mamince za korekturu a rodině za podporu doma.

V Brně dne: **22. května 2018**

.....  
podpis autora

Experimentální část této diplomové práce byla realizována na výzkumné infrastruktuře  
vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0072

**Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX)**  
operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

# Obsah

<b>Úvod.....</b>	<b>13</b>
<b>1. Automatizace.....</b>	<b>14</b>
1.1 Průmysl 4.0.....	15
1.2 CPS – Kyberneticko-fyzické systémy.....	16
1.3 IoT – Internet věcí.....	18
1.4 Výpočetní výkon.....	19
1.5 Shrnutí.....	20
<b>2. Robotická ramena v průmyslu.....</b>	<b>21</b>
2.1 Definice.....	21
2.2 Dělení.....	22
<b>3. Inverzní kinematika.....</b>	<b>26</b>
3.1 Řešený příklad.....	27
<b>4. Průzkum a příprava před realizací.....</b>	<b>32</b>
4.1 Konstrukce.....	32
4.2 Pohon.....	33
4.2.1 Pneumatické pohony.....	33
4.2.2 Hydraulické pohony.....	37
4.2.3 Elektrické pohony.....	39
4.3 Řízení.....	42
<b>5. Realizace modelu robotického ramene.....</b>	<b>46</b>
5.1 Konstrukce.....	47
5.1.1 Technologie 3D tisku.....	49
5.2 Pohon.....	54
5.3 Enkodér.....	56
5.4 Hardware - Řízení.....	58
5.5 Firmware - MCU.....	61
5.6 Software – PC rozhraní.....	62
<b>6. Závěr.....</b>	<b>64</b>

# Seznam symbolů a zkratk

## Zkratky:

3D	...	3 dimenzionální
ABS	...	Akrylonitrilbutadienstyren
CPS	...	Cyber-Physical System
DC	...	Direct Current
DOF	...	Degrees of freedom
EEPROM	...	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
FEKT	...	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
HAL	...	Hot Air Leveling
HW	...	Hardware
I2C	...	Inter-Integrated Circuit
IoT	...	Internet of Things
IPv6	...	Internet Protocol version 6
ISO	...	International Organisation for Standardisation
IT	...	Informační Technologie
LED	...	Light Emitting Diode
MCU	...	Microcontroller Unit
MEMS	...	Micro-Electro-Mechanical Systems
PET-G	...	Polyetylentereftalát-Glykol
PLA	...	Polylaktid
PMMA	...	Polymethylmethakrylát
PWM	...	Pulse Width Modulation
RFID	...	Radio Frequency Identification
SPI	...	Serial Peripheral Interface
SRAM	...	Static Random Access Memory
SW	...	Software
USB	...	Universal Serial Bus

VUT	...	Vysoké učení technické v Brně
Wi-Fi	...	Standard bezdrátové komunikace (také WLAN)

## Seznam obrázků

Obr. 1.1 Automatizovaná stanice a operátor[3].....	14
Obr. 1.2 Od doby páry k inteligentní továrně – Průmysl 4.0[5].....	15
Obr. 1.3 Vizualizace struktury 5C pro CPS[8].....	16
Obr. 1.4 Schéma systému CPS[9].....	17
Obr. 2.1 Různé typy moderních robotů Kuka[13].....	21
Obr. 2.2 Redundantní robot Kuka se 7 DOF[14].....	22
Obr. 2.3 Paralelní robot firmy ABB[15].....	23
Obr. 2.4 Kartézský manipulátor[16].....	24
Obr. 2.5 Scara robot[17].....	24
Obr. 2.6 Modulární robot[18].....	25
Obr. 3.1 Kinematický model robotického ramene.....	27
Obr. 3.2 Zobrazení ramene v souřadnicovém systému.....	28
Obr. 3.3 - Schéma pro vazbu Rz1.....	28
Obr. 3.4 - Schéma pro vazby standardního pohybu.....	29
Obr. 4.1 Schéma a řez jednočinnými válci[21].....	34
Obr. 4.2 Dvojčinný válec[22].....	35
Obr. 4.3 Elektromagnetický ventil s možností zapojení do ventilového bloku[23].....	37
Obr. 4.4 Zubové čerpadlo[24].....	38
Obr. 4.5 Blokové schéma serva.....	44
Obr. 5.1 Blokové schéma komplexního řešení modelu robotického ramene.....	46
Obr. 5.2 Fotka složeného modelu robotického ramene.....	47
Obr. 5.3 Kybernetické dvojče v SolidWorks.....	52
Obr. 5.4 Síť konečných prvků před spuštěním simulace.....	53
Obr. 5.5 Grafický výsledek simulace.....	53
Obr. 5.6 Základna s pastorkem náhonu a oběžným kolem.....	55
Obr. 5.7 Deska enkodéru z obou stran a její plastový kryt.....	56
Obr. 5.8 Elektrické schéma obvodu s magnetickým enkoderem.....	57
Obr. 5.9 Deska Arduino Mega 2560[30].....	58

Obr. 5.10 Deska shieldu RAMPS 1.4[31].....	59
Obr. 5.11 Elektrické schéma obvodu s driverem A4988 (datasheet).....	60
Obr. 5.12 Ukázka hlavního okna aplikace.....	63



## Seznam tabulek

Tabulka 5-1 Vybrané parametry některých materiálů.....	51
Tabulka 5-2 Výsledky statické analýzy.....	54

# ÚVOD

Elektronika a automatizace hýbe dnešním světem. Začalo to chytrými telefony, pokračuje chytrými hodinkami, automobily, domy, ale také i chytrými továrnami nebo celými městy. Někdy se jedná o automatizaci čistě na úrovni softwaru v podobě umělé inteligence a strojového učení, jindy jde o zásah do reálného světa, jako je automatizovaná výroba nebo řízení automobilu a zamykání domů. Všechny tyto příklady splňují důležitou podmínku, která pojem automatizace zahrnuje, a to samočinný systém. Takové systémy vykonávají svou funkci s minimální nebo žádný podíl lidského faktoru. Ale přes to přese vše se jedná v průmyslu spíše o trend a ne o úplnou samozřejmost. Již dnes je ve většině výroбах dominantní, v ostatních je dominantním prvkem mechanizace. Výroby bez těchto prvků jsou spíše výjimkami.

Mechanizace zahrnuje způsoby, které usnadňují lidem práci, např. lis, pneumatický buchar, přímo ovládané manipulační zařízení apod.

Automatizace je označením pro samočinné systémy, které tolik nepotřebují lidský faktor k chodu. Člověk spíše reguluje a kontroluje práci výrobního stroje. V případně potřeby rozhodnutí rozhoduje právě člověk.

V posledních letech se stále více mluví o termínu „Průmysl 4.0“. Ten, na rozdíl od výše zmíněných, potřebuje lidský faktor pouze pro naprogramování a údržbu. Rozhodování a komunikace mezi jednotlivými výrobními stroji probíhá automaticky, bez potřeby člověka.

Nejširší využití v Průmyslu 4.0 má, i díky své univerzálnosti, právě robotické rameno. Pouhou změnou pracovního nástroje a řídicího programu je možné ho přeměnit na zařízení s odlišnou funkcí. Různý počet stupňů volnosti pak určuje jak pohyblivost a přístup do obtížně dosažitelných míst, tak i jeho cenu. S připojením senzoriky a inteligentní řídicí jednotky zvládne díky konstrukci i značnou variabilitu, např. obrábět více variant výrobků na jedné lince (úspora zdrojů na strojích a prostoru).

A právě automatizaci a pod ni spadající koncept Průmysl 4.0 včetně průmyslových robotických ramen tato práce řeší po teoretické stránce. Zkoumá typy užívaných systémů a také jejich principy, výhody a nevýhody. V praktické části poté řeší návrh a následnou stavbu modelu robotického ramene využívajícího řešení z velkých průmyslových robotů.

# 1. AUTOMATIZACE

Je to už nějakou dobu kdy se toto slovo začalo používat ve spojení s průmyslovou výrobou a dnes rezonuje v odborné společnosti ve spojení ještě s jedním názvem, a to Průmysl 4.0.

Pojem automatizace znamená přechod od vědomé činnosti k činnosti samovolné. V technice pak přímo směr zavádění a užívání samočinných zařízení (nejlépe bez obsluhy).<sup>[1]</sup> Historicky však automatizaci předcházela mnohem jednodušší mechanizace. Ta spočívá v poskytování potřebné síly pracovníkovi k vykonání jinak fyzicky náročné nebo lidskou silou neuskutečnitelné operace (lis, válcna). Někdy mohou prostředky mechanizace cyklicky opakovat jednoduchý pohyb (pneumatický buchar) a tím pracovníkovi umožnit používat obě ruce nebo zkrátit čas o obsluhu.<sup>[2]</sup>

V dnešní době existují různé stupně automatizace napříč obory i jednotlivými výrobami. Nejčastější jsou automatizované stanice ovládané nebo jen kontrolované operátorem kombinované v různé míře s úseky výroby využívajícími mechanizaci a manuální pracovní síly. Tendencí je řetězení stanic do větších celků, jejíž části mezi sebou v různé míře komunikují, za účelem dosažení tzv. komplexní automatizace. Jedná se o teoretický ideální stav, kdy by došlo k úplnému odstranění lidského prvku a tím i možného zdroje chyb. Takový stav je však v aktuální praxi neuskutečnitelný a neudržitelný a v současnosti se stává spíše námětem vědecko-fantastických románů. Ale i o letech na Měsíc se kdysi jen psalo.



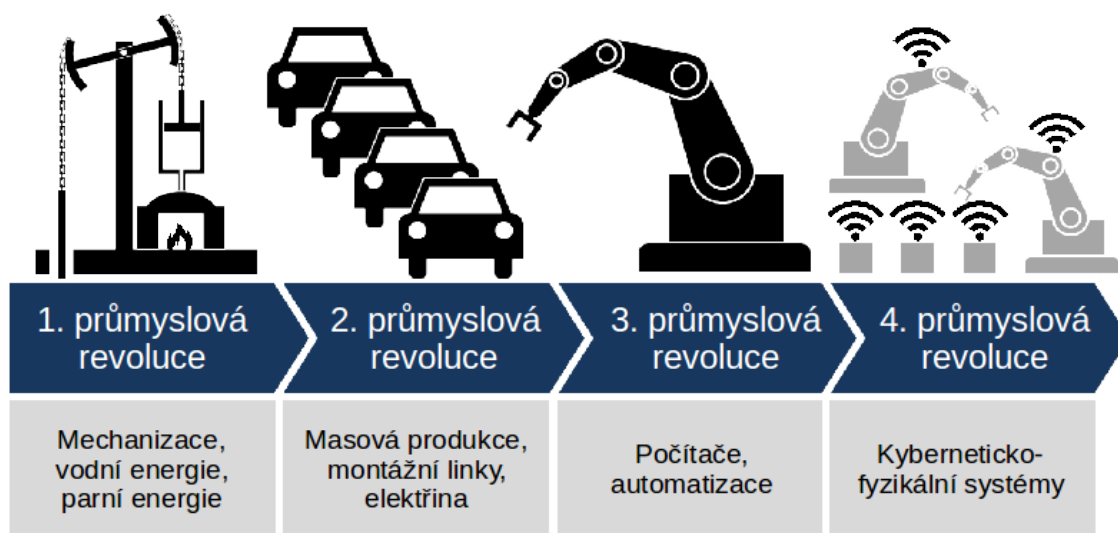
**Obr. 1.1 Automatizovaná stanice a operátor<sup>[3]</sup>**

V reakci na vývoj technologií a společnosti se začala objevovat mimo jiné i myšlenka rovnocennosti role člověka a automatizační techniky a jejich postavení do role partnerů, kdy technika pomáhá lidem udržovat technologické procesy efektivní, bezpečné a především spolehlivé. I když je to v kontrastu s definicí automatizace (bez lidského faktoru), objevují se stále více snahy o rovnováhu mezi těmito dvěma směry vývoje průmyslové výroby. I tyto impulsy daly vzniknout Průmyslu 4.0.

## 1.1 Průmysl 4.0

Průmysl 4.0 (anglicky Industry 4.0), označován někdy též 4. průmyslová revoluce nebo Práce 4.0, vychází z projektu strategie pokročilých technologií německé vlády s originálním názvem Industrie 4.0.<sup>[4]</sup> Termín byl poprvé použit roku 2011 na Hannoverském veletrhu. V roce 2015 projevila náklonnost k Průmyslu 4.0 i Česká republika vydáním dokumentu Iniciativa Průmysl 4.0.

Hlavním cílem konceptu je maximální optimalizace a automatizace průmyslové výroby ve všech odvětvích. Způsoby dosažení toho cíle se neustále vyvíjí a to včetně dopadu tohoto řešení na společnost. Vzhledem k rostoucí medializaci Průmyslu 4.0 se současní zaměstnanci ve výrobních dotazují iniciátorů projektů, co se stane s lidskou pracovní silou, až nebude vzhledem k plánované úrovni automatizace potřeba.



**Obr. 1.2** Od doby páry k inteligentní továrně – Průmysl 4.0<sup>[5]</sup>

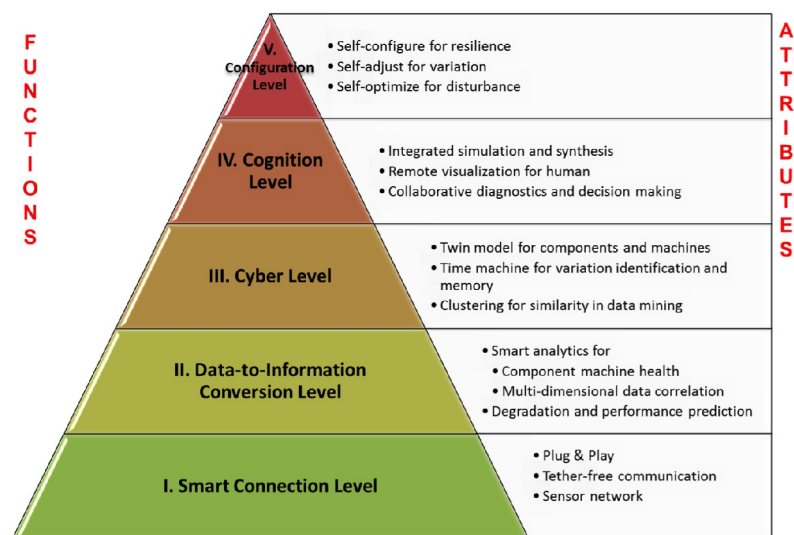
Řešení této otázky se již objevují a nazývají je koboty (z anglického cobot – collaborative robot). Jedná se o roboty přímo určené pro výrobu ve spolupráci s člověkem. Jejich vzhled je navržen, aby pro člověka působil přirozeněji jak standardní průmyslové ramena. Tvar minimalizuje poranění v případě možné kolize s člověkem. Spolupráce kobota a člověka probíhá na jedné stanici výroby a na stejném výrobku. Výrobní operace si dělí a nebo si u nich pomáhají. Robot v takovém případě nabízí svou vysokou přesnost, neúnavnost a téměř neomylnost. Člověk naopak vyniká vyšší volností pohybu, lepší rozlišovací a vyhodnocovací schopností včetně schopnosti reagovat na nečekané události. Robot s člověkem se takto doplňují a navzájem se kontrolují za dosažením lepších výsledků ve výrobě.

## 1.2 CPS – Kyberneticko-fyzické systémy

Klíčovým prvkem konceptu Průmysl 4.0 jsou kyberneticko-fyzické systémy (CPS - Cyber-Physical System). Jedná se o systémy skládající se z mnoha fyzických prvků řízených sofistikovanými počítačovými algoritmy někdy založenými na strojovém učení. Jednotlivé řídicí výpočetní jednotky mezi sebou úzce komunikují a spolupracují za účelem autonomního rozhodování.<sup>[6]</sup> Díky tomu mohou výrobní proces optimalizovat korekcí v nastavení fyzických systémů. Tato zpětnovazební smyčka umožňuje dosáhnout vysoké kvality za nízkých výrobních nákladů a krátkém výrobním čase.

Pro návrh a realizaci kyberneticko-fyzikálních systému je možné využít architektury 5C (connection, conversion, cyber, cognition, configuration)<sup>[7]</sup>:

- I. Úroveň připojení (HW úroveň) – plug&play, Wi-Fi komunikace, senzorika
- II. Konverzní úroveň – smart analýza kondice strojů, předvídání degradace
- III. Kybernetická úroveň – model pro reálné komponenty, sledování událostí;
- IV. Úroveň poznání – integrovaná simulace a syntéza, vzdálená vizualizace pro lidskou obsluhu, diagnostika a rozhodování
- V. Konfigurační úroveň – sebe-konfigurace odolnosti, sebe-přizpůsobení variacím a sebe-optimalizace vůči rušení



Obr. 1.3 Vizualizace struktury 5C pro CPS<sup>[8]</sup>

Dnešní informační technologie jsou jak po hardwarové, tak po softwarové stránce natolik sofistikované, že poskytují špičkovou podporu na všech úrovních architektury 5C.

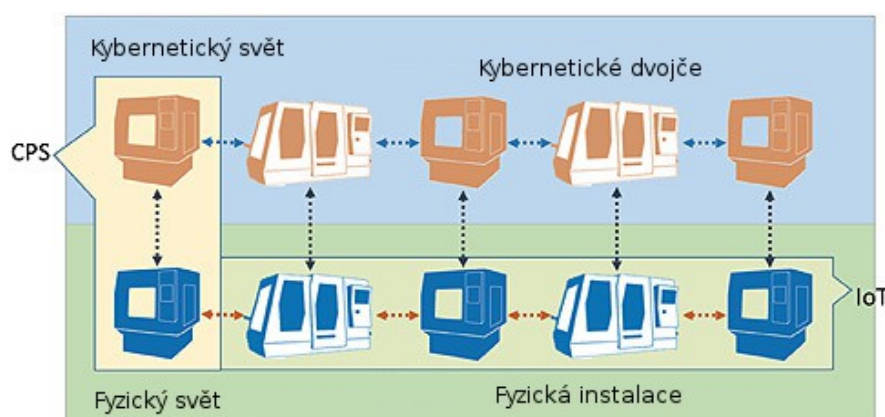
Na úrovni připojení existuje množství standardů umožňujících vzájemnou komunikaci a spolupráci zařízení (USB, I2C, SPI, Ethernet apod.) včetně možností bezdrátové komunikace (Wi-Fi, RFID). Pokrok v technologiích umožňuje konstruovat senzory v podstatě všech známých fyzikálních veličin a konkrétně pokrok v polovodičové výrobě umožňuje umisťovat senzory přímo na výpočetní čipy (MEMS technologie).

Integrace sensoriky souvisí i s úrovní konverze. Data v surové formě je možné zpracovat na stejném čipu, kde se nachází senzor, a poté sdílet s okolím jen data v ten okamžik relevantní. Další náročnější vyhodnocování dat pro určení kondice strojů a její predikce probíhá také na počítačích s větším výpočetním výkonem.

Kybernetická úroveň pracuje s virtuálním dvojčetem fyzického stroje. Potřeby vyšších vrstev pomáhá převádět do reálného světa a jako zpětná vazba zprostředkuje pro vyšší vrstvy obraz o aktuálním stavu stroje za pomoci nižších vrstev (sledování událostí).

Kognitivní vrstva (vrstva poznání) provádí na základě dat z virtuálního dvojčete simulace a diagnostiku. Umožňuje také vzdálenou vizualizaci pro lidskou obsluhu a na základě získaných dat ze simulací a diagnostiky dokáže ve spolupráci s člověkem správně rozhodnout o dalších krocích.

Konfigurační vrstva o CPS prvek jako celek a optimalizuje svůj chod za účelem minimálních chyb.



**Obr. 1.4 Schéma systému CPS<sup>[9]</sup>**

### 1.3 IoT – Internet věcí

Zkratka IoT vychází z anglického pojmenování Internet of Things. Internet věcí je masivní síť fyzických zařízení, jež mohou pouze přijímat, vysílat a nebo obousměrně komunikovat se sítí a nejsou určeny pro ovládání spojení přímo člověkem. Mezi zařízení spadající pod Internet věcí můžeme zařadit vozidla, domácí spotřebiče, jednoduché senzory, informační tabule, jednoduché mechanické prvky (zámky, rolety), kamery a jiné. Člověk tato zařízení používá, ale jejich komunikaci se sítí nemůže ovlivnit. Pro množství obsažených koncových zařízení v síti se využívá IPv6 protokolu, který poskytuje dostatečné prostředky pro adresaci všech zařízení.

Internet věcí má využití v mnoha oblastech. Jednou z nich je „Chytrá domácnost“. V podstatě se jedná o automatizaci domácnosti, jako automatické spínání a vypínání světel, ovládání rolet, hlasové ovládání, video monitoring apod. Objevují se i pokusy a zapojení praček a ledniček do sítě. Pračka vám pošle oznámení o doprání pomocí aplikace na mobilním zařízení a lednička sleduje docházející potraviny, které je schopna sama objednat nebo kontroluje záruční dobu na potravinách a včas upozorní o její expiraci.

Další oblastí uplatnění je doprava a městská infrastruktura. Chytrá městská síť s množstvím senzorů dokáže efektivně monitorovat a řídit dopravu, regulovat frekvenci městské hromadné dopravy, spravovat energetické systémy apod. Kromě řízení dopravy dle aktuální reálné vytiženosti je možné uvést jako příklad inteligentní pouliční osvětlení a světelné horizontální značení vozovky. V oblasti zdravotnictví se pak využívá k monitoringu zdravotního stavu nebo konfiguraci kardiostimulátorů a jiných elektronických implantátů.<sup>[10]</sup>

Pro podnikové využití se pak používá termínu „Enterprise IoT“ (EIoT). Tyto sítě slouží pro automatizaci ve skladech a výrobních. Dalším možným využitím jsou i třídící uzly balíků pro přepravní a doručovací služby. Vzhledem k definici CPS – propojení fyzických strojů a elektronické sítě, můžeme pak Enterprise IoT považovat za kyberneticko-fyzické systémy.

## 1.4 Výpočetní výkon

Se stoupající složitostí současných výrobků stoupají i nároky a složitost strojů které je vyrábějí. Ruku v ruce s oběma těmito faktory stoupají stále více i požadavky na výpočetní výkon. Zpočátku výrobního procesu je potřeba daný výrobek teprve navrhnout a virtuálně optimalizovat jeho model a parametry. Zde přichází první potřeba výpočetní techniky s dostatečným výkonem pro chod návrhových systémů (v dnešní době již často ve 3D) a následné simulace popř. optimalizace nedostatků. Další úloha výpočetní techniky přichází ve fázi přípravy a následné optimalizaci výroby. Když se opomine samotná výroba manipulátorů jako fyzických prvků pro CPS, je potřeba pro ně sestavit a nahrát základní sekvenci pohybů pro výrobu daného produktu a také nakonfigurovat výpočetní část CPS systémů. A právě tato část potřebuje dostatečně silný hardware pro svůj správný chod.

Některé autonomní systémy vyžadují velice silný výpočetní výkon. Údržba systému s takovým výpočetním výkonem je však dosti náročná na specializaci obsluhy i provoz podpůrných systémů. Cloud computing však nabízí výpočetní výkon po síti. Výhodou je soustředění jak výpočetních zařízení, tak i zařízení podpůrných na jednom místě a tím i ušetření nákladů na provoz. Stačí jedna nebo dvě chladicí soustavy pro komplex obsluhující i desítku různých průmyslových výrob vzdáleně po síti. Odborně školený personál s praxí v oboru IT zaručuje hladký chod serverů a rychlou a profesionální reakci v případě nečekané havárie. Firma pracující přímo v oboru investuje do hardwaru i softwaru a zajišťuje tak neustálou inovaci a navyšování výpočetního výkonu.

Dnešní trendy ukazují na stále komplexnější zpracování dat a také na stále větší objem zpracovávaných dat (tzv. Big data). Kromě známých a osvědčených poměrně jednoduchých algoritmů se vytvářejí složité a komplexní algoritmy podporující strojové učení. Nejnovějším trendem je strojové učení pomocí tzv. neuronových sítí. Jedná se o model spadající mezi umělé inteligence. Základem je vymodelování virtuální kopie mozkových neuronů (buněk) určitého typu a jejich následné propojování za účelem vytvoření sítě. Existují dvě základní metody učení.



Metoda učení s učitelem nechá neuronovou síť vyhodnotit nějaký úkol a učitel následně porovná dosažené výsledky se správnými výsledky. Zjištěné chyby opraví korekcí a proces se opakuje dokud se nedosáhne požadovaných výsledků. Při metodě bez učitele nezná učitel žádné získané výsledky. Všechny výsledky i korekce provádí umělá inteligence neuronové sítě sama. Stejný princip učení používají i děti a dal by se nazvat jako „Metoda pokus-omyl“. Výsledné neuronové sítě poté dokáží vyhodnotit obrazy (pozná předměty pouze na principu kategorizace) nebo dokáže sama složit symfonii ve stylu známého hudebního skladatele. Stejně algoritmy je možné použít i při zpracování obrazů ve výrobě. Umělá inteligence se pak v podstatě učí ze svých vlastních chyb a zkušeností.<sup>[11]</sup>

## 1.5 Shrnutí

Konečným cílem Průmyslu 4.0 je přesná, spolehlivá a efektivní výroba s maximální kontrolou výrobního procesu. Nebude se již jednat o tradiční pásovou výrobu s totožnými výrobky, ale bude možné vyrábět s různou konfigurací pro každý kus. Již v dnešní době Průmysl 4.0 ve větší či menší míře využívají některé německé firmy z oboru automotive. Většina prostor ve výrobě je téměř zcela bez lidské přítomnosti. Každé vozidlo a některé důležité komponenty jsou osazeny IoT prvkem a díky tomu je monitorován každý krok výroby, přesné podmínky, časy trvání nebo použitá konfigurace. V případě závady je pak možné lehce dohledat nedostatky v procesu. Autonomní robotické manipulátory osazují automaticky sestavu dle konfigurace zjištěné z IoT prvku, což dává možnost vyrábět na jedné lince více modelů se stejnou efektivitou jako jeden model. Kromě maximální automatizace se také objevují hlasy pro začlenění člověka do nové generace průmyslu a využít kobotů – kooperativních robotů.

Hlavním cílem je výrobní procesy a technologie v reálné výrobě ještě více přiblížit teoretickému konceptu a především rozšířit z oblastí jako automotive a aero i do ostatních průmyslových odvětví.

## 2. ROBOTICKÁ RAMENA V PRŮMYSLU

### 2.1 Definice

Průmyslová robotická ramena spadají dle definice Mezinárodní organizace pro standardizaci (International Organisation for Standardisation - ISO) pod normu s označením ISO 8373 – Manipulační průmyslové roboty. Dle této normy je průmyslový robot automaticky řízený, reprogramovatelný, víceúčelový manipulační stroj, stacionární nebo umístěný na pojezdu, určený k použití v průmyslové automatizaci.<sup>[12]</sup> Obory robotiky a automatizace si od vzniku prvních průmyslových robotů prošly dlouhým vývojem. Nově do tohoto oboru pronikají pokročilé kybernetické modely chování a strojového učení. V dnešní době existuje velké množství druhů a variant robotů. Základními druhy jsou:

- Manipulátor (jednoúčelový s pevným programem)
- Synchronní manipulátor (ovládán člověkem – prodloužení ruk)
- Robot (s pružným programem)
- Adaptivní robot (reaguje na změny – více variant výrobků na lince apod.)
- Kognitivní robot (schopnost rozhodování díky umělé inteligenci).<sup>[12]</sup>

A právě kognitivní roboty jsou stále více častým jevem pro svou všestrannost a maximální stupeň automatizace.

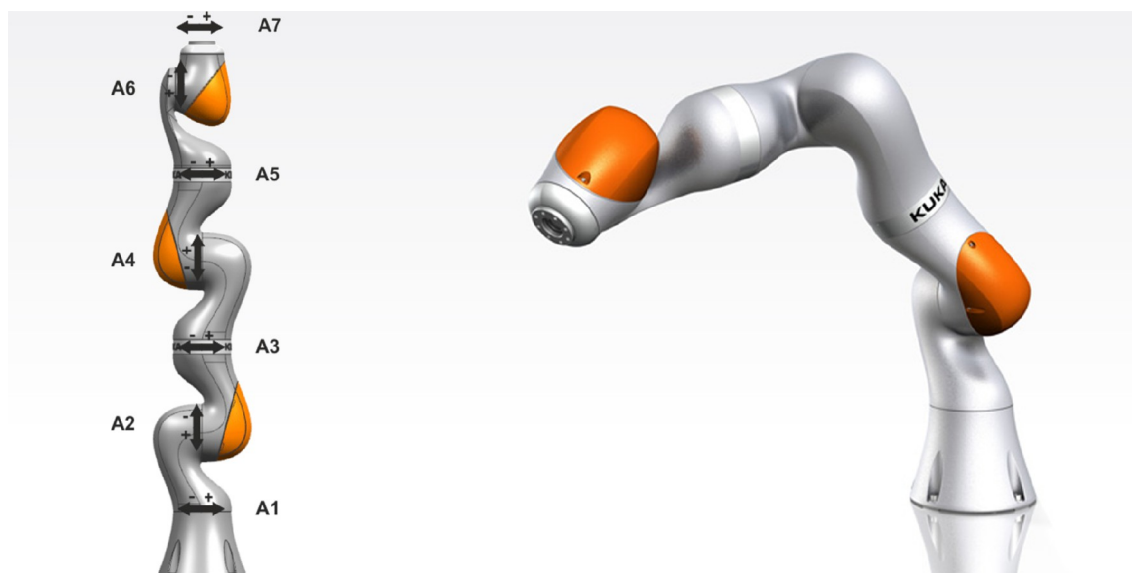


Obr. 2.1 Různé typy moderních robotů Kuka<sup>[13]</sup>

## 2.2 Dělení

Robotické manipulátory poskytují vzhledem ke své definici opravdu velkou variabilitu ve své konstrukci. Tato rozmanitost parametrů pak umožňuje vhodné zvolení pro každé použití. Jejich správnou kombinací je možné vytvořit technicky dostatečně vyhovující, ale přitom ekonomicky výhodné řešení ve všech oborech použití. Výše uvedené dělení je pouze to zcela základní. Kromě něj existuje mnoho parametrů, podle kterých je možné roboty dělit a jejich znalost může dopomoci ke správné volbě vhodného řešení. Zde je jejich výčet<sup>[12]</sup>:

- **Klasifikace podle počtu stupňů volnosti:**
  - Univerzální robot – se 6 stupni volnosti, jednoznačně vymezující v kartézském souřadném systému polohu a orientaci manipulovaného předmětu
  - Redundantní robot – s více jak 6 stupni volnosti, umožňujících pohyb za překážkou
  - Deficitní robot – s méně jak 6 stupni volnosti, provádějící montáž v rovině, scara roboty nebo roboty pro jednodušší manipulaci



Obr. 2.2 Redundantní robot Kuka se 7 DOF<sup>[14]</sup>

- **Klasifikace podle druhu pohonu:**

- Pneumatický pohon
- Hydraulický pohon
- Elektrický pohon

Každý z těchto pohonů má své výhody a nevýhody. Problematika pohonů je podrobně řešena v kapitole 4.2.

- **Klasifikace podle kinematické struktury:**

- Sériové roboty – s otevřeným kinematickým řetězcem (open-loop chain)
- Paralelní roboty – s uzavřeným kinematickým řetězcem (closed-loop chain)
- Hybridní roboty – kombinace obou předchozích



**Obr. 2.3 Paralelní robot firmy ABB<sup>[15]</sup>**

- **Klasifikace podle vykonávaných činností a oblastí nasazení:**

- Průmyslové roboty – výroba produktů
- Servisní roboty – obslužné činnosti (zdravotnictví, domácí práce, údržba, záchranná práce apod.)

- **Klasifikace podle geometrie pracovního prostoru:**
  - Kartézské – osy x, y, z
  - Cylindrické – obsluha prostoru o tvaru válce
  - Sférické – obsluha prostoru tvaru koule
  - Angulární – nejčastější robot ve výrobě (viz obr. 2.1 nebo 2.2)
  - Scara – cylindrické segmenty v sérii



**Obr. 2.4 Kartézský manipulátor<sup>[16]</sup>**



**Obr. 2.5 Scara robot<sup>[17]</sup>**

- **Klasifikace podle kompaktnosti konstrukce:**
  - Univerzální
  - Modulární (též modulové)



**Obr. 2.6 Modulární robot<sup>[18]</sup>**

### 3. INVERZNÍ KINEMATIKA

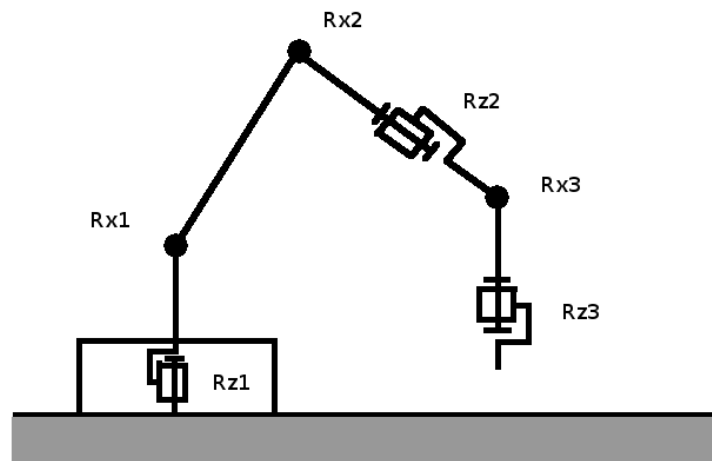
Inverzní kinematika je metoda pro určení konfigurace robota (tj. poloha a výchylka všech kloubů) pro danou výslednou souřadnici v pracovním prostoru<sup>[19]</sup>. Díky této metodě je možné zadávat do rozhraní cílové souřadnice pohybu ve tvaru (x, y, z). Softwarová aplikace nebo přímo řízení robota si poté souřadnice pomocí algoritmu inverzní kinematiky převede do potřebné konfigurace jednotlivých částí robota. Kromě určování polohy robota v provozu je možné metodu využít k nalezení pracovního prostoru nebo jeho omezení např. z důvodu překážky, rozdílné výškové úrovně základny robota a pracovní plochy apod. Dále se musí uvažovat také s možnostmi uchopení břemene. Břemeno může nabývat různých úhlů k podložce nebo také rotací a jejich kombinací. Variabilita sklonu a rotace uchopení je dána počtem stupňů volnosti, konfigurací kloubů a také aktuální polohou robota – některé klouby použité k dosažení polohy břemene nemohou být použity k dosažení orientace břemene<sup>[20]</sup>.

Pro řešení inverzní kinematiky je potřeba znát rozměry jednotlivých částí robota, případně i maximální možné výchylky kloubů a především pak osu jejich rotace/posunu. Také je vhodné vytvořit si zjednodušený model kinematického řetězce. Ty se skládají z jednotlivých členů (rameno) a vazeb (kinematická dvojice, kloub). Průmyslové roboty používají pouze dva druhy kinematických dvojic. Jsou to vazby rotační (R) a posuvné (T)<sup>[12]</sup>.

Pro úlohy inverzní kinematiky se v dnešní době nejčastěji užívá specializovaných programů pro její simulaci a nebo je možné využít přímo modelovacích aplikací, ve kterých se roboty navrhují a využít přesný model ke sledování kolizí sebe sama v místech vazeb. V případě výpočetní techniky je algoritmus pro výpočet inverzní kinematiky vypočítán automaticky z rozměrů a počtu členů a z druhů a počtu kinematických dvojic. Pro určení inverzní kinematiky v projektu je použito zjednodušení přenosem jednotlivých členů a vazeb do 2D prostoru pro ruční výpočet. Ruční výpočet je volen především kvůli názornosti a jako konkrétní případ inverzní kinematiky. Výsledné vzorce budou také použity v aplikaci pro ovládání realizovaného robotického ramene a v hardwaru řízení ramene.

### 3.1 Řešený příklad

V práci řešený a realizovaný model robotického ramene je robotem univerzálním díky svým 6 stupňů volnosti. Všechny tyto stupně volnosti (kinematické dvojice) jsou rotačního typu, žádná z kinematických dvojic není posuvná. Půlka z nich má rotační osu rovnoběžnou s osou ramene a zbylé tři jsou na ni kolmé. Pro určení polohy jakéhokoliv tělesa v 3D prostoru je potřeba 6 nezávislých souřadnic a to rotační ( $R_x$ ,  $R_y$ ,  $R_z$ ) a posuvné ( $T_x$ ,  $T_y$ ,  $T_z$ )<sup>[12]</sup>. I když se v tomto případě jedná pouze o kinematické dvojice typu R (rotační), je s nimi možno pokrýt volnost v rotaci i v posunu ve všech 3 osách ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) díky vzájemné kooperaci více dvojic v jeden okamžik nebo postupně v kaskádě.

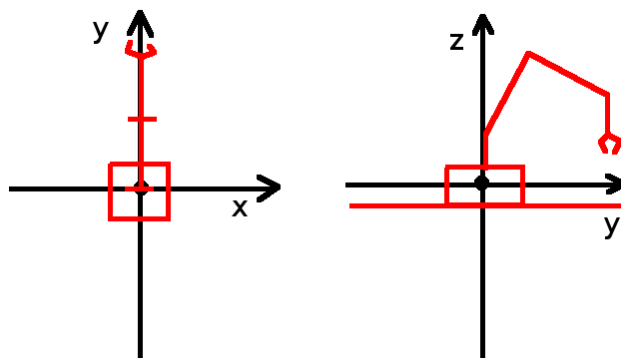


Obr. 3.1 Kinematický model robotického ramene

Většina výpočtů vychází z dvourozměrného znázornění jednotlivých kinematických dvojic jakožto dvou stran trojúhelníků. Trojúhelníky jsou různě skládány a přes dílčí úhly se snažíme dobrat konečné hodnoty úhlu dvou navzájem umístěných kinematických dvojic. Pro výpočty jsou globální souřadnice/osy označeny následovně:

- $x$  – vpravo/vlevo,
- $y$  – dopředu/dozadu,
- $z$  – nahoru/dolů.



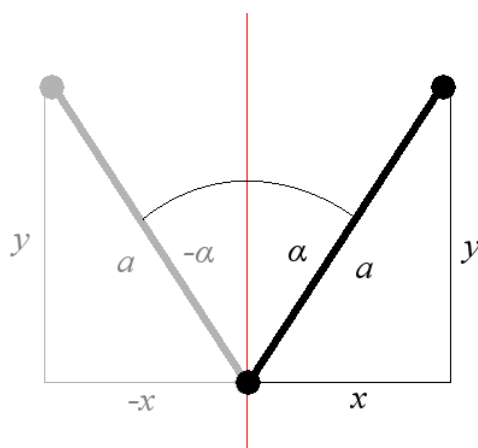


**Obr. 3.2 Zobrazení ramene v souřadnicovém systému**

Kinematická dvojice **RzI** je první v pořadí od základny. Její osa je jako jediná neměnná v jakékoliv konfiguraci a je rovnoběžná s osou  $z$ . Úhel  $0^\circ$  je dosažen při orientaci ramene rovnoběžně s osou  $y$  (přímo vpřed). Výpočet konfigurace této vazby je jednoduchý, jelikož nezávisí na ostatních vazbách ani vzdálenosti bodu. Stačí využít souřadnic  $x, y$  jako rozměry odvěsen pravoúhlého trojúhelníku a dopočítat výchylku dle vzorce:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{|x|}{|y|} \qquad a^2 = x^2 + y^2 \qquad (3.1; 3.2)$$

kde  $\alpha$  je úhel výchylky (směr výchylky určuje znaménko souřadnice  $x$ ). Druhý, též jednoduchý vzorec 3.2, nám bude nápomocen při dalších operacích – určuje totiž vzdálenost bodu od počátku ( $a$  = vzdálenost v rovině  $x, y$ ).

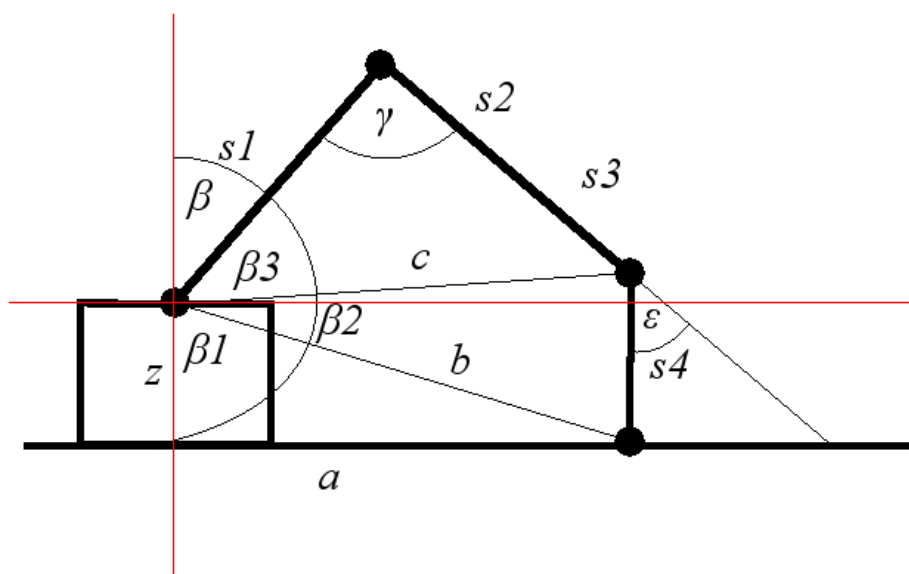


**Obr. 3.3 - Schéma pro vazbu Rz1.**

Kinematická dvojice ***Rx1*** je naopak první závislou jak na vzdálenosti bodu, tak na výchylce jiných vazeb. Výpočet je značně složitější oproti ***Rz1*** a počítá se přes 3 trojúhelníky (v případě vertikální polohy posledního úseku s čelistí). Postup je následovný:

$$b = \sqrt{z^2 + a^2} \quad \beta_1 = \arctan\left(\frac{a}{|z|}\right) \quad (3.3; 3.4)$$

kde  $z$  je výškový rozdíl od roviny ***Rx1*** a  $b$  je přímý vzdálenost od polohy ***Rx1*** k cílovému bodu. Vzorcem 3.4 se vypočítá první úhel potřebný k určení výchylky  $\beta$ .



Obr. 3.4 - Schéma pro vazby standardního pohybu.

Vzorcem:

$$c^2 = b^2 + s_4^2 - 2 \cdot b \cdot s_4 \cdot \cos \beta_1 \quad (3.5)$$

vypočítáme stranu dalšího trojúhelníku  $c$  a dále ji použijeme pro výpočet dalšího dílčího úhlu. Délka posledního segmentu je vyjádřena jako  $s_4$ .

$$\beta_2 = \cos^{-1} \left( \frac{c^2 + b^2 - s_4^2}{2 \cdot c \cdot b} \right) \quad (3.6)$$

upravením předchozího vzorce a dosazením vhodných hodnot dostaneme další dílčí úhel  $\beta_2$ . Nyní chybí dopočítat poslední dílčí úhel a zjistit doplňkový úhel do  $180^\circ$  (naše výchylka vazby  $Rx1$ ). Ten se vypočítá prakticky stejně, jen vyměníme některé strany:

$$\beta_3 = \cos^{-1} \left( \frac{s_1^2 + c^2 - (s_2 + s_3)^2}{2 \cdot s_1 \cdot c} \right) \quad (3.7)$$

A posledním krokem je jednoduché odečtení všech dílčích úhlů od  $180^\circ$ .

Kinematická dvojice **Rx2** je v tomto řešení závislá na přímé vzdálenosti bodu. Budeme vycházet z předchozích výpočtů.

$$\frac{c}{(s_2 + s_3)} = \frac{\sin \gamma}{\sin \beta_3} \quad \text{po úpravě} \quad \sin \gamma = \frac{c \cdot \sin \beta_3}{(s_2 + s_3)} \quad (3.8; 3.9)$$

a dále můžeme provést korekci podle nulové polohy vazby, kterou si určíme dle potřeby.

Poslední kinematická dvojice pro standardní pohyb je **Rx3**. Jelikož známe množství úhlů z předchozích výpočtů, navážeme na ně. Úhel  $\varepsilon$  vypočítáme pomocí doplňků do trojúhelníku a poté do roviny:

$$\varepsilon = 180^\circ - \left( (180^\circ - (\beta_3 + \gamma)) + (180^\circ - (\beta_1 + \beta_2)) \right) \quad (3.10)$$

Odvozených vztahů nyní využijeme pro výpočet konkrétního příkladu. Volba souřadnic bude náhodná. Pro rozměry modelu inverzní kinematiky budou použity následující rozměry:

- $s_1 = 200,0\text{mm}$
- $s_2 = 140,0\text{mm}$
- $s_3 = 95,5\text{mm}$
- $s_4 = 35,0\text{mm}$

Osazení jednotlivých částí odpovídá výše uvedeným vzorcům. Jako výchozí souřadnice si zvolíme  $x, y, z = (20; 180; -20)$  mm. To znamená že souřadnice odpovídají poloze vpravo vpředu pod rovinou  $xy$ . První si vypočítáme úhel natočení kolem osy  $z$ :

$$\alpha = \arctan\left(\frac{|x|}{|y|}\right) = \arctan\left(\frac{|20|}{|180|}\right) = 6^\circ 20'$$

Jako další následuje úhel  $\beta$ , který vypočteme pomocí dílčích úhlů:

$$\beta_1 = \arctan\left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{|z|}\right) = \arctan\left(\frac{\sqrt{20^2 + 180^2}}{|-20|}\right) = 83^\circ 42'$$

$$c^2 = z^2 + x^2 + y^2 + s_4^2 - 2 \cdot \sqrt{x^2 + y^2} \cdot s_4 \cdot \cos \beta_1$$

$$c = \sqrt{(-20)^2 + 20^2 + 180^2 + 35^2 - 2 \cdot \sqrt{(-20)^2 + 20^2 + 180^2} \cdot 35 \cdot \cos(83,698)} = 181,72$$

$$\beta_2 = \arccos\left(\frac{c^2 + b^2 - s_4^2}{2 \cdot c \cdot b}\right) = \arccos\left(\frac{181,72^2 + (-20)^2 + 20^2 + 180^2 - 35^2}{2 \cdot 181,72 \cdot \sqrt{(-20)^2 + 20^2 + 180^2}}\right) = 11^\circ 2'$$

$$\beta_3 = \arccos\left(\frac{s_1^2 + c^2 - (s_2 + s_3)^2}{2 \cdot s_1 \cdot c}\right) = \arccos\left(\frac{200^2 + 181,72^2 - (140 + 95,5)^2}{2 \cdot 200 \cdot 181,72}\right) = 76^\circ 1'$$

$$\beta = 180^\circ - \beta_1 - \beta_2 - \beta_3 = 180 - 83,7 - 11 - 76 = 9^\circ 18'$$

Poté úhel  $\gamma$  odpovídající vazbě Rx2:

$$\gamma = \arcsin\left(\frac{c \cdot \sin \beta_3}{(s_2 + s_3)}\right) = \arcsin\left(\frac{181,72 \cdot \sin(76^\circ)}{(140 + 95,5)}\right) = 48,479^\circ = 48^\circ 28'$$

A nakonec úhel  $\varepsilon$  pro vertikální polohu posledního segmentu:

$$\varepsilon = 180^\circ - ((180^\circ - (\beta_3 + \gamma)) + (180^\circ - (\beta_1 + \beta_2)))$$

$$\varepsilon = 180^\circ - ((180^\circ - (76 + 48,5)) + (180^\circ - (11 + 83,7))) = 39,2^\circ = 39^\circ 12'$$

Tím jsme získali všechny potřebné úhly vazeb pro dosažení souřadnic  $x, y, z = (20; 180; -20)$  mm.

## 4. PRŮZKUM A PŘÍPRAVA PŘED REALIZACÍ

Před vlastním návrhem a realizací tak komplexního projektu jako je model robotického ramene je vhodné provést průzkum problematiky a nastudovat si dostatečně teorii ve všech oborech do projektu zasahujících. Jednotlivé problematické celky jsou rozebrány v následujících podkapitolách.

### 4.1 Konstrukce

Konstrukce průmyslových robotických ramen je většinou robustní a z pevné oceli z důvodu přesnosti pohybu a manipulace. Deformace konstrukce ramene pod zátěží uchopeného předmětu, nástroje nebo pod vlastní tíhou je nežádoucí. V některých procesech by mohla snižovat přesnost výroby nebo ji zcela znemožnit. Dalším důvodem robustnosti je také potlačení vibrací způsobených rychlou akcelerací a decelerací ramene. Dalším prvkem moderních ramen je kompaktní povrch bez množství vystupujících dílů, u kterých hrozí zachycení nebo v případě nehody s osobou vážná zranění. Hladší povrch případné následky zmírňuje.

Robotické manipulátory mají široké využití a to i mimo průmysl, například ve zdravotnictví, kosmickém výzkumu, podmořském výzkumu apod. V průmyslu se robotických manipulátorů užívá z vícero důvodů, i když primárním je ulehčení práce.

Kromě toho jsou zde i důvody, bez nichž by některé výrobní procesy nebyly ani uskutečnitelné a nebo jen velmi těžko a složitě uskutečnitelné. Jedním z nich je například manipulace s velice těžkými břemeny, ať už transport na krátké vzdálenosti nebo změna rotace na místě. Dalším důvodem je riziko zranění manipulovaným předmětem kvůli jeho vlastnostem. Může se jednat o předmět radioaktivní, žhavý nebo s rizikem chemického poleptání apod. Obdobně tak se vyskytují procesy, při nichž se jinak bezpečný předmět vkládá do pracovních prostor, které generují riziko zranění. Opět se může jednat o pracovní komory obsahující radioaktivní materiál, vysoké teploty, korozivní nebo jinak životu nebezpečnou atmosféru. Robotické manipulátory se používají i kvůli své jemné motorice. Některé průmyslové operace vyžadují manipulace s vysokou přesností, kterou lidská ruka není schopna docílit. S touto vlastností souvisí i udržitelná opakovatelnost operací. Dále je důležitá i rychlost a neúnavnost robotů, která je v moderních výroбах velice důležitá kvůli vysoké poptávce. V poslední řadě stojí za zmínku využití na velkou dálku v místech pro člověka nedostupných. Nejedná se přímo o průmyslové využití, ale o jedno z nejčastějších využití mimo průmysl (již zmíněný kosmický výzkum, výzkum oceánů, záchranné operace uvízlých osob, inspekce a opravy potrubí apod).

## 4.2 Pohon

Každý manipulátor potřebuje ke své činnosti také vhodný pohon. I když v dnešní době využívají téměř všechny pohony v průmyslu jako vstupní zdroj energie elektřinu, pro uskutečnění samotného pohybu manipulátoru se využívají tři hlavní principy. Dva z nich využívají elektřinu k přenosu energie na médium a jeden využívá energii v podstatě přímo:

- Pneumatický pohon.
- Hydraulický pohon.
- Elektrický pohon.

Čistě elektrické jsou stejnosměrné, střídavé nebo lineární elektrické motory. Dalším typem jsou pohony pneumatické, které jsou v lineárním nebo rotačním uspořádání a stejné uspořádání nabízí i pohony hydraulické. Každý z těchto pohonů má své výhody a nevýhody.

### 4.2.1 Pneumatické pohony

Jako první blíže popsaný pohon bude pohon založený na pneumatických systémech. Jako médium pro přenos energie využívají vzduch. Při použití pneumatického řešení je většinou jedna velká strojovna zajišťující potřebný tlak pro určitý úsek. Pro získání tlaku v systému se využívá elektrických motorů, a to buď pro pohon rotační turbíny nebo pístového kompresoru. Kromě vytváření dostatečného tlaku vzduchu je potřeba tento vzduch před i po použití vhodně upravit. Především se jedná o vzduchové filtry, jež zbavují nasávaný atmosferický vzduch od prachových částic. Tento důležitý prvek zamezuje vniku částic do pracovních prostor, kde by přispívaly ke tření, fungovaly jako brusná pasta a tím výrazně snižovaly životnost daného systému. Dále je pro správnou činnost a dlouhou životnost vhodné použít sušiček vzduchu. Ze suchého vzduchu pak již nemůže kondenzovat vlhkost ani při změnách tlaku a způsobovat vnitřní korozi prvků. Kondenzování na ventilech a tím ovlivňování jejich činnosti bude také zamezeno. Také je potřeba mazacích jednotek. Ty do pneumatického systému vstříkují malé množství mazacího média v podobě jemného aerosolu. To zajišťuje dostatečné mazání kovových částí v místech tření. V neposlední řadě je docela důležitá těsnost systému. Není to ani tak podmínka pro bezpečnost jako pro účinnost a ekonomičnost. Každý zbytečný únik vyžaduje dočerpávání vzduchu pro dorovnání tlaku a tím i spotřebovanou energii. Navíc je vzduch, jakožto plyn s malými molekulami, na těsnost náročnější než kapalina.

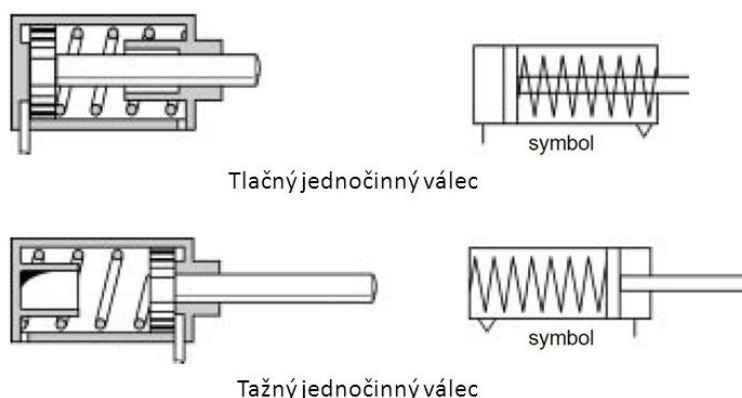
Kromě problematiky vlastního média pohonu je zde opětovné využití energie uložené v tlaku vzduchu. V případě pneumatických systémů existuje docela široká paleta použití média a to i díky jeho všudepřítomnosti (nevzniká riziko kontaminace okolí). Jsou zde čtyři základní typy:

- lineární,
- rotační,
- „ofuk“,
- podtlak.

Nejpoužívanější lineární pneumatické pohony jsou pneumatické válce s pístní tyčí. Dle konstrukce je možné je dále dělit na:

- jednočinné,
- dvojčinné.

Jednočinné válce mají pouze jeden přívod vzduchu pro ovládání. Díky němu se naplní komora a uvede se píst spolu s pístní tyčí do pohybu z klidové polohy do polohy pracovní. Vzhledem k jedinému přívodu by však píst zůstal v této pracovní poloze a proto je potřeba další síly k vrácení do klidové polohy. K tomu je možné použít nějakého závaží nebo druhého pístu působícího přes nějaké břemeno. Mnohem častější je však užití konstrukce s vratnou pružinou. Ta je během pracovního cyklu z klidové polohy do pracovní stlačována a akumuluje energii. Po ukončení působení vysokého tlaku vzduchu díky ovládacím ventilům převáží energie stlačené pružiny sílu již atmosferického tlaku vzduchu a píst přejde z polohy pracovní zpět do polohy klidové.



**Obr. 4.1 Schéma a řez jednočinnými válci<sup>[21]</sup>**

Dále dělíme jednočinné válce ještě podle konfigurace pístnice na:

- Se zasunutou pístnicí v klidové poloze.
- S vysunutou pístnicí v klidové poloze.

Mezi těmito typy volíme dle konkrétního použití. Když je v rámci výrobní operace výrobek zdvižen do pracovní polohy pouze na zlomek času pracovního cyklu, je vhodné použít jednočinného válce se zasunutou pístnicí v klidu. Tlak vzduchu je poté pro udržování pístnice vysunuté v pracovní poloze potřeba jen v krátkém čase. Naopak pokud válec drží ve vysunuté poloze zavřené sklopné dvířka a jen jednou za několik pracovních cyklů je otevře svým zasunutím, je výhodnější použít válec s pístnicí vysunutou v klidové poloze.

Dvojčinné pneumatické válce nemají definovanou klidovou a pracovní polohu. Ta je určena až zapojením dvou jejich vstupů a označením při ovládání. Pro jejich správnou funkci musí být neustále pod tlakem vzduchu, aby zůstaly v některé z definovaných poloh (klidová nebo pracovní). V případě úplného výpadku pneumatického tlaku jsou písty zcela volné. V případě vertikálního umístění „spadnou“ vlivem gravitace do spodní polohy (ať už pracovní nebo klidová) a v horizontální poloze záleží, v jakém směru působí větší vnější síla. V této situaci je velmi snadné s nimi manipulovat i manuálně. Obdobný problém může nastat i v případě tlaku na obou stranách. Kromě vnějších sil má vliv na jejich konečnou polohu také nastavení škrtkových ventilů na jednotlivých vstupech. Oba tyto neurčité stavy mohou způsobit kolizi a při dostatečné síle použitých válců i poškození nebo vážnější zranění osob. Proto je potřeba písty vhodně zapojit a také ovládat a provádět údržbu. Pracovní a klidová poloha je většinou určena zapojením a následně je vhodně označena softwarově ve firmware mikroprocesoru nebo v aplikaci řídicího počítače. Vzhledem k oboustrannému použití pneumatického tlaku má válec v obou směrech srovnatelnou sílu (v tlaku i tahu) na rozdíl od jednočinného, kdy musí být pružina slabší než pneumatika, aby mohla být spolu s břemenem přetlačena.

Pro oba tyto případy je vhodné využít metody kontroly koncových poloh (viz kapitola 4.3 - Řízení).



**Obr. 4.2 Dvojčinný válec<sup>[22]</sup>**



Rotační pneumatické systémy se nejčastěji používají pro rotaci maximálně do 360°. První možností jak dosáhnout rotačního pohybu je systém s lineárním pístem a převodem na pohyb rotační. Druhou možností je válec s kruhovou dráhou (obvykle 180° nebo 360°). V tomto případě se nepoužívá pístní tyče, ale posuvných saní (v případě opisování kruhového pohybu mimo osu) nebo přímo hřídele (v ose kruhového pohybu). Vzhledem k použití pístů má píst opět dvě koncové polohy.

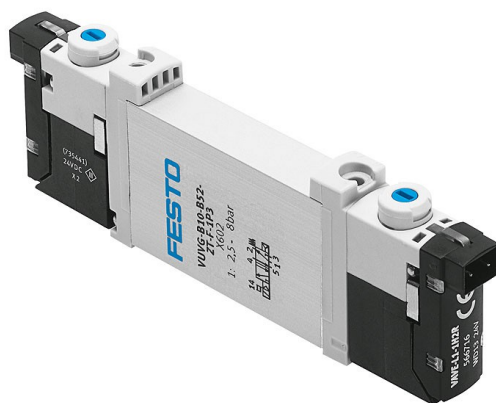
V rozsahu pohybu neomezený rotační motor používá lopatkové turbíny nebo písty v uspořádání jako na parním stroji nebo spalovacím motoru. Směr rotace u turbíny je možné regulovat směrem proudění vzduchu (u radiální i axiální turbíny) nebo natočením lopatek u axiální turbíny. Směr rotace v případě pístového pohonu s převodem je dán pořadím pohybu pístů. Tento typ je však nevhodný pro neustálou rotaci kvůli neustálému přechodu z pracovní do klidové polohy a naopak. Naopak vhodný může být při cyklické rotaci o daný úhel v jednom směru.

Další dvě použití jsou typické právě jen pro pneumatické systémy. Prvním z nich je posun výrobků, součástek nebo jen očištění pracovních ploch a někdy je označován jako tzv. ofuk. Jako posun na větší vzdálenosti se používá stejně jako potrubní pošta – v uzavřeném vedení z trubek nebo hadiček je součást dopravována stálým tlakem vzduchu na potřebné místo. Výhodou tohoto řešení je jednoduchost, po celé délce vedení není potřeba žádného dalšího zařízení a dle velikosti a tvaru předmětu je možné ho přesouvat na vzdálenosti několika metrů. Na krátkou vzdálenost se používá doslova jako „ofuk“, kdy malá tryska posunuje nebo přitlačuje součástku. Také se používá pro čištění plochy například od pilin při vrtání. V elektrotechnice je též známa metoda HAL (Hot air leveling), kdy je proudem vzduchu omývána deska plošných spojů vytahována z cínové lázně.

Druhé použití typické pro pneumatické systémy jsou podtlakové přísavky. V tomto případě se využívá druhé strany systému – vstupu vzduchu do kompresoru. Podtlaku se používá především k uchopení a následné jemné manipulaci nebo k uchopení těžko uchopitelných předmětů (uchopení skla přísavkami). Nejčastěji se používají měkké silikonové přísavky pro maximalizaci těsnosti a tím i podtlaku. Při dostatečném poměru podtlaku a nízké hmotnosti součásti je možné použít jen rovně zařezané hadičky.

Pro řízení a regulaci výše zmíněných pneumatických systémů se využívá ventilů a škrtkových ventilů. V praxi se nejčastěji volí manuálně řízené škrtkové ventily, kterými se nastaví množství vzduchu na vstupu a tím i jeho rychlost pohybu. Proud vzduchu se nastaví při sestavení manipulátoru nebo se ještě při zkušební výrobě optimalizuje pro maximální spolehlivost procesu a dále se upravuje jen v případě změny procesu.

Ventily se používají elektromagnetické jednocestné nebo i vícecestné. Konfigurací ventilů na ventilovém bloku se určuje do které pracovní komory kterého válce bude tlak vzduchu směřován. Pro kontrolu ventilů se používá elektrického napětí nejčastěji v rozmezí 5 až 24V.

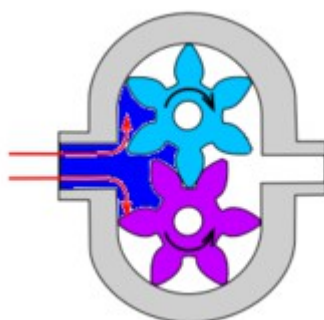


**Obr. 4.3 Elektromagnetický ventil s možností zapojení do ventilového bloku<sup>[23]</sup>**

## 4.2.2 Hydraulické pohony

Hydraulické systémy se využívají mnohem častěji. A to i když je potřeba speciální médium pro přenos energie. Jako u předchozích pneumatických systémů se využívá k vytváření tlaku kapaliny především elektrických motorů, někdy i spalovacích. A to buď převodem na lineární pohyb a následnému použití pístů a nebo pomocí tzv. zubového čerpadla. Na rozdíl od vzduchu s nízkou viskozitou a navíc potřebou vysokých otáček k jeho stlačení, zubová čerpadla jsou typická řádově nižšími otáčkami, vyšší těsností a odlišným způsobem použití tlaku, a to jak kvůli své konstrukci, tak kvůli odlišným vlastnostem použitého média. Stlačitelnost vzduchu způsobuje, že se turbínou nebo pístem přidává stále nový objem plynu do tlakové nádrže nehlédě na používání systému a to až do dosažení požadovaného tlaku. Poté je tlakování přerušeno nebo použit přetlakový ventil. Zubová čerpadla však tlak takto vytvářet nemohou kvůli nestlačitelnosti kapaliny. Pokud je systém nastaven na spoření energie, čerpadlo se spustí pouze při potřebě tlaku a jak název napovídá, spíše než k tlakování nějaké zásobní nádoby dochází k čerpání kapaliny do pístu a k působení tlaku přímo tam.

Druhou možností, používanou hlavně na hydraulických systémech stavebních strojů poháněných spalovacím motorem, je použití kroutícího momentu motoru a neustálý chod zubového čerpadla. V takovém případě je ve velké míře využíván tzv. přepad – ventil, který je otevřen v případě zavření všech ovládacích ventilů. Zároveň může sloužit jako přetlakový ventil. Dále je v systému potřeba výměník tepla. Kapalina se třením ale i změnou tlaku zahřívá a vzhledem k uzavřenosti systému je potřeba teplo odvést. Kromě průmyslové výroby se těchto systémů využívá i u těžkých stavebních strojů (bagry, jeřáby apod) nebo u automobilů (posilovač řízení, brzdový systém – příklad manuální vytváření tlaku).



**Obr. 4.4 Zubové čerpadlo<sup>[24]</sup>**

U hydraulické kapaliny se dbá na minimální stlačitelnost, chemickou kompatibilitu s hydraulickým systémem (nemělo by docházet ke korozi kovových částí ani k naleptání, tvrdnutí ani jiným změnám použitých těsnění a pohyblivých hadic), tepelnou odolnost, a také nízkou absorpci vody nebo dostatečné mazací vlastnosti. Vzhledem k tomu, že se jedná o uzavřený pracovní okruh, jsou požadavky na úpravu média minimální (filtr pevných částic před zubovým čerpadlem). Vzhledem k malé stlačitelnosti kapaliny je přenos energie s menším zpožděním a s vyšší přesností. Změna poměru přenosu síly je prováděna průměrem pístu bez převodů. Rychlost pohybu je pak regulována průtokem kapaliny do válce spolu s otáčkami zubového čerpadla. Nevýhodou je neekologičnost hydraulické kapaliny, která může být jedovatá až korozivní pro živou hmotu. Navíc v případě havárie je riziko úniku média a znečištění výrobních prostor.

Díky výše zmíněnému nebezpečí znečištění a cenně média existují na rozdíl od pneumatických systémů jen dva druhy výstupního využití:

- lineární,
- rotační.

Lineární systémy využívají písty pohybující se ve válci. Opět máme válce jednočinné a dvojčinné. Jednočinné hydraulické válce využívají pro pohyb v jednom směru tlaku kapaliny a pro pohyb v druhém směru jiných sil. Mohou to být buď síly vnější (například gravitace) nebo integrované pružiny uvnitř válce. Dvojčinné potřebují k obousměrnému pohybu dva vstupy, resp. výstupy kapaliny. I když se vše jeví jako totožné s pneumatickými lineárními pohony, rozdílné médium dává zcela jiné možnosti použití. Po uzavření všech vstupů do válce je díky nestlačitelnosti kapaliny píst ve zcela stabilní poloze. Právě díky tomu je možné plynule přecházet mezi koncovými polohami nebo mezi nimi i zastavit. Vzhledem k těsnosti systému je možné polohu přesně kontrolovat vstupním nebo výstupním objemem kapaliny. Druhou možností je sledování polohy pomocí vnější senzoriky.

Rotační pohony, nazývané též hydromotory, využívají principu zubového čerpadla, jen obráceně. Místo pohonu otáčejícího ozubenými koly a vytvářejícího proud/tlak kapaliny je přes ventil regulován proud kapaliny do hydromotoru, kde otáčí s ozubenými koly a ty přes hřídel přenáší pohyb ven ze systému. Tento systém se nejčastěji používá u pracovních strojů (například kombajn).

Rotační pohyb je možné dosáhnout i lineárním pohonem s převodem (robotická ramena), kde je pro kontrolu vhodnější snímání rotačního pohybu než toho lineárního.

Do skupiny hydraulických systémů patří i tzv hydrodynamické měniče (také hydrodynamické spojky). Tento systém potřebuje pro svou činnost vstupní a výstupní lopatkové kolo v těsné blízkosti. Využívá se především v automatických převodovkách.

### **4.2.3 Elektrické pohony**

V dnešní době jsou jednoznačně převažující elektrické pohony robotických manipulátorů. I přes velké množství pohyblivých částic, se zde nevyužívá ani plynného ani kapalného přenosného média a pohyb je z elektrické energie generován přímo (i v předchozích případech se využívá motorů k přenosu elektrické energie do média). Bez prostředníka však nedochází k dalším ztrátám energie. Stlačení i tření kapalin a plynů totiž produkuje odpadní teplo, které je potřeba nějak odvádět. Navíc odpadá neustálá starost o médium (filtry, vlhkost) i o těsnost celé soustavy (těsnění pístů, trubek, gufera rotačních částí).

I přes tyto výhody se ve většině případů používají ozubené převody nebo řemeny pro změnu poměru přenosu síly nebo pro prostorové uspořádání. Pak je možné použít například tři velké silné motory v jednom tělese ramene. Většinou jsou umístěny nejbližší základně pro dosažení nižší hmotnosti na vzdálenějších částech ramene a tím snížení setrvačnosti a zvýšení dynamiky pohybu. Moment síly je poté důmyslným systémem ozubených převodů, řemenic nebo jejich kombinací přenášen na celkem tři klouby ramene, na každý zvlášť (samozřejmě počet tří motorů a kloubů je jen příkladný). Využívá se vhodných ozubených kol nebo ozubených řemenic (ozubení je důležité jak kvůli přenosu energie, tak kvůli přesnosti pohybu). Nevýhodou takového řešení je množství pohyblivých částí (převodů, řemenic, hřídelí), u kterých může dojít k selhání a je potřeba je kontrolovat. Případná oprava může být komplikovaná. Naopak výhodou je na straně údržby motorů. Pokud je většina motorů, především těch robustnějších a silnějších zajišťujících pohyb větších a hmotnějších částí ramene, umístěna na jednom místě v dobře dostupném prvním segmentu ramene, bude jejich případná oprava, výměna i pravidelná údržba mnohem jednodušší a rychlejší. Navíc odpadá i nutnost řešení přívodu energie k motorům přes jednotlivé klouby.

K vlastnímu pohonu se využívá elektrických motorů jak stejnosměrných, tak i střídavých nebo krokových a to v závislosti na konkrétním použití. Mezi pohony je možné zařadit také servo motor, i když se v podstatě jedná o systém pohonu a zpětné vazby.

Jak název napovídá, stejnosměrné elektrické motory používají stejnosměrný proud. Změna směru proudu (polarity napětí) se používá pouze při potřebě změny směru otáčení. Regulace otáček se provádí změnou napětí (předřadný odpor). Stejnosměrný motor se skládá ze statoru s vyniklými magnetickými póly. Může se jednat o permanentní magnety nebo o elektromagnet se stálou polaritou vytvářející uvnitř statoru magnetické pole. V tomto poli je pak umístěn rotor s vinutím a komutátorem. I když se motor nazývá stejnosměrný a je také napájen stejnosměrným proudem, bez proměnné složky by zůstal ve stabilní poloze určené směrem magnetického pole. Pro zajištění rotace je potřeba komutátoru. Ten neustálým přepínáním napětí na vinutí rotoru vytváří střídavé magnetické pole a dostává tím rotor do nestabilní polohy vůči magnetickému poli statoru. Výsledkem je rotace ve směru dle polarity přiloženého napětí.

Motory využívající střídavého proudu mají dva základní typy. Oba typy využívají stator s vinutím a střídavým napájením (nejčastěji 3-fázové). Průběhem napětí na vinutí se vytváří uvnitř statoru točivé magnetické pole (směr rotace je dán zapojením fází na jednotlivá vinutí). Rychlost rotace motoru je dána frekvencí střídavého proudu. S frekvencí se totiž mění i rychlost otáčení magnetického pole. Rozdíl v obou typech přichází až na straně jejich rotorů.

Synchronní motor využívá vyniklé, tedy stálé magnetické pole. Je možné použít přímo permanentních magnetů nebo elektrickým proudem buzené vinutí. Na rozdíl od stejnosměrného motoru se polarita magnetického pole díky komutátoru nemění, ale je udržována v pevně daném směru. Díky tomu rotor přesně sleduje rotující magnetické pole statoru, v podstatě synchronně.

Asynchronní motor pro generování magnetického pole v rotoru využívá indukovaných proudů. Samotný rotor má konstrukci připomínající klec z tyčí. Rotací magnetického pole statoru jsou v kleci indukovány proudy. Tyto proudy poté samy vytvářejí vlastní magnetické pole, které sledují otáčivé pole statoru a pohybují s rotorem. Vzhledem k indukci se však pole rotoru vytváří se zpožděním a proto je zpožděno i otáčení rotoru, otáčí se tedy asynchronně.<sup>[25]</sup>

Krokové motory jsou dalším typem elektrického motoru. Jeho předností i slabinou je možnost přesného řízení kroku. Výhoda je právě v případě robotiky, kdy můžeme přesně počítat kroky a regulovat pohyb ramene.<sup>[26]</sup> Nevýhoda je větší složitost obvodů pro ovládání, kdy je vhodnější použití přímo mikroprocesoru s řadičem. Krokový motor se skládá ze statoru s vyniklými póly, který je navíc opatřen zevnitř zuby, které ovlivňují tvar magnetického pole. Rotor je tvořen permanentními magnety a je také opatřen zuby pro ovlivnění tvaru magnetického pole. V místě opačné polarit statoru a rotoru jsou zuby přitahovány k sobě. Při neměnném magnetickém poli statoru je rotor pevně držen ve statické poloze (síla je dána velikostí proudu ve vinutí). Otáčení se provádí postupnou změnou polarit ve vinutí za vytvoření zdánlivě rotujícího magnetického pole. Rotor toto pole krok po kroku sleduje a rotuje s ním. Vhodným nastavením je možné dosáhnout i  $\frac{1}{2}$  kroku (zub rotoru je mezi dvěma zuby statoru) nebo i jemnějšího kroku. I přes přesnost kroku se při větší zátěži může stát, že motor o jeden i více kroků přeskočí a jeho reálná poloha neodpovídá poloze spočítané softwarově dle kroků. Pro takové případy je vhodné opatřit motory na výstupu ještě zpětnou vazbou (minimálně pro určení nulového bodu).

Servo motor využívá nejčastěji stejnosměrného motoru v kombinaci s řadičem, komparátorem, převodovkou a potenciometrem na výstupu převodovky. Podrobnější popis serva v další kapitole.

## 4.3 Řízení

Při ovládání pohybu s vysokou přesností je vhodné použít také zpětnou vazbu pro kontrolu této přesnosti. Tato zpětná vazba je v případě některých pohonů přímo nezbytná, v případě jiných jen jako doplňková. Obecně existuje více možností řízení pohybu s různou výslednou přesností. Níže jsou uvedeny a popsány všechny možné metody řízení včetně jejich negativních a pozitivních vlastností.

První a nejméně spolehlivou metodou je řízení na základě času spuštění pohonu. Při konstantních podmínkách, jako je neměnný odpor nebo příkon, je možné při známé hodnotě otáček (rychlosti) pohonu regulovat uraženou vzdálenost (také počet otáček nebo úhel) pomocí času. Nezávislou proměnnou je tedy délka časového pulsu a závislou je potom mechanický pohyb. Kvůli možným třecím silám (hmotnost břemena, hmotnost vlastního manipulátoru, objem břemene při vyšších rychlostech) může dojít k odchylkám rychlosti a tím i k odchylce ve výsledné délce pohybu. K podobnému jevu může dojít také při kolísání napájení. Oba případy platí i pro hydraulické a pneumatické pohony.

Další variantou bez zpětné vazby je možnost pohonu s definovaným délkovým krokem. Pokud je z principu pohonu definován pevný krok, nemůže za normálních podmínek dojít k nečekaným odchylkám jako v předchozím případě. Zástupcem tohoto druhu pohonu je například krokový motor nebo i pístový pohon s převodovkou (jeden takt pístu otočí první kolo převodovky o definovaný neměnný úhel). Příklad kdy může nastat k odchylce v délce pohybu, je přetížení břemenem, kolize manipulátoru nebo úplné selhání nebo vynechání přívodu energie.

V obou předchozích případech je možné konečnou odchylku redukovat díky vhodně zvolenému převodnímu poměru. Ten může minimalizovat vliv břemene na zátěž pohonu a ve výsledku i odchylku v délce pohybu. Pokud však zařízení nemá mechanický doraz od kterého by se počítala uražená dráha pohybu, jsou tyto metody bez zpětné vazby pro přesné řízení stejně nepoužitelné.

Následující typy řízení již využívají mimo pohonu i nějaký druh zpětné vazby a to buď o počáteční poloze, o koncových polohách a nebo o poloze po celé délce dráhy pohybu, avšak v různé přesnosti kroku (rozlišovací přesnost).

První možností je využití optické závory, magnetických senzorů nebo mechanického spínače pro inicializaci v počáteční, tedy nulové, poloze. První je nutné rozpohybovat zařízení směrem ke snímači a po jeho dosažení dojde k zastavení pohonu a následnému určení nulové polohy. Poté je možné řídit pohyb jako ve zmíněných metodách bez zpětné vazby s tím, že je již známa poloha manipulátoru počítána od výchozího bodu. Opět je možné použít pohony s definovaným časovým i délkovým krokem. Výsledná přesnost délky pohybu bude i v tomto případě lepší pro pohon s definovaný délkovým krokem.

Další možností je kontrola pomocí senzorů koncových poloh. Jako senzory je možné použít stejné typy spínačů jako u kontroly výchozího bodu. V takovém případě jsou možné přesuny mezi koncovými body a díky zpětné vazbě je zde možnost sledovat, zda manipulátor těchto poloh bezpečně dosáhl. Takový typ řízení je vhodný pro manipulátory s tzv. pracovní a klidovou polohou. Nejčastějším zástupcem jsou písty (hydraulické i pneumatické). Jedním z příkladů je zdvíhací zařízení na stanici linky, kdy je po zastavení pásu výrobek vyzdvižen a zafixován pro další prováděné operace. Další příklad je otáčení výrobku o  $180^\circ$  kvůli oboustranné montáži. Koncová poloha 1 je před otočením a koncová poloha 2 po otočení.

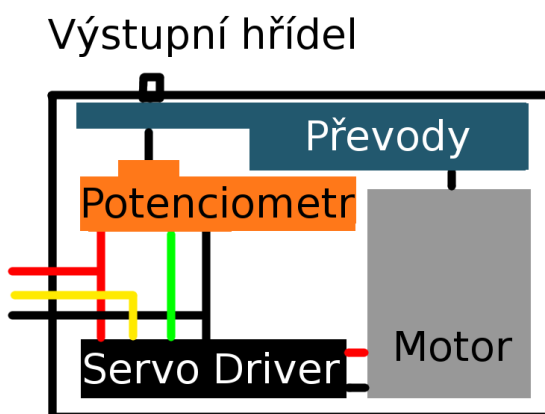
V případě metody kontroly koncových poloh je možné pohonné ústrojí manipulátoru řetězit v ose pohybu nebo skládat i mimo tuto osu. V obou případech je možné dosáhnout mnohem složitějšího pohybu a přitom nad ním mít dostatečnou kontrolu. Řetězení v ose pohybu navíc umožňuje sledovat více bodů v dráze pohybu v jedné ose. I tak je opět možné jen sledovat, zda manipulátor dosáhl bodu koncového snímače a zbytek jeho dráhy zůstává mimo kontrolu. Navíc v závislosti na rychlosti pohonu je potřeba nastavit pro vyhodnocení koncové polohy dostatečnou prodlevu po impulsu k pohybu. Pokud by prodleva byla krátká, zařízení by hlásilo chybu ještě před dosažením koncové polohy i při normální funkci. Naopak v případě nastavení příliš dlouhé prodlevy by stanice čekala zbytečně dlouho, než by nepřítomnost manipulátoru v koncové poloze vyhodnotila jako chybu. Z toho také vyplývá, že pokud se jedná o časově dlouhý pohyb (nízká rychlost, dlouhá dráha nebo kombinace obou), může v případě kolize manipulátoru již na začátku dráhy uplynout delší doba k vyhodnocení chyby. Taková prodleva znamená časové ztráty ve výrobě, vyšší riziko mechanického poškození (výrobku, manipulátoru, jiného zařízení) nebo zranění osob.



Zpětnou vazbu s ještě vyšší přesností lze realizovat pomocí optické závoru. V tomto případě se nejedná o stejnou závoru jako v případě určení jednoho nulového (unikátního) bodu, ale mechanismus využívající děrovaný disk/pásek procházející optickou závorou. Řídící obvod poté počítá průchody okének závorou a vyhodnocuje uraženou vzdálenost pohonu. Stejný princip využívaly také kuličkové počítačové myši nebo v dnešní době kolečko na optických myších.

Určitou nevýhodou tohoto systému je relativní informace o poloze a limitace velikosti kroku velikostí okének. Oba tyto nedostatky je možné odstranit. Relativní informaci o poloze lze převést na absolutní pomocí další optické závoru pro určení nulového bodu. Poté je možné počítat od nulového bodu s absolutní hodnotou polohy. Limitaci kroku je možné redukovat díky použití převodů a vhodnému umístění senzoru. Pokud se děrovaný disk se závorou umístí na nejméně zpřevodované kolo (nejblíže motoru), tak se jeden krok s nízkou přesností projeví na výstupu převodovky jako dostatečně přesný (přesnost závisí na převodním poměru). Samozřejmě mimo optické závoru je možné použít i jiných mechanismů využívajících stejného principu počítání kroků (magnetický, mechanický).

Zpětná vazba s absolutní informací o poloze nevyžaduje žádnou mechanickou inicializaci (nájezd do nulové polohy) kromě kalibrace při vlastní montáži nebo překalibrování pro udržení požadované přesnosti. Nejběžnějším systémem využívající této zpětné vazby je servo motor. Servo motor obsahuje motor s převodovkou, dodávající mu sílu a přesnost pohybu na výstupu. Na výstupní hřídeli je umístěn potenciometr snímající aktuální polohu v absolutní hodnotě, kterou předává jako hodnotu napětí z výstupu proměnného odporového děliče servo kontroléru. Komparátor, jež je součástí kontroléru, porovná napětí z potenciometru s řídicím signálem a dle toho se nastaví polarita napájení motoru, čímž se uzavře smyčka zpětné vazby.



Obr. 4.5 Blokové schéma serva

Kromě uceleného systému jako je servo, je možné pohon řídit přímo s vyhodnocením informace v mikrokontroléru, kdy MCU přebírá roli komparátoru. Výhodnou je přímá kontrola a možnost zásahu v případě kolize (vyhodnocení z neplánovaného zastavení uprostřed dráhy). I v tomto případě je možné využít i jiné možnosti zjištění absolutní polohy. Kromě potenciometru je možné použít například magnetický enkodér, který má neomezený rozsah otáčení.

Vzhledem k potřebě získání absolutní informace závisí přesnost zpětné vazby přímo na přesnosti senzoru, jelikož ji není možné neomezeně zvyšovat převodovým poměrem. V případě enkodéru s rozsahem více jak  $360^\circ$  (více-otáčkový potenciometr) nebo kombinací více zpětných vazeb na různých úrovních převodovky je možné dosáhnout i vyšších přesností.

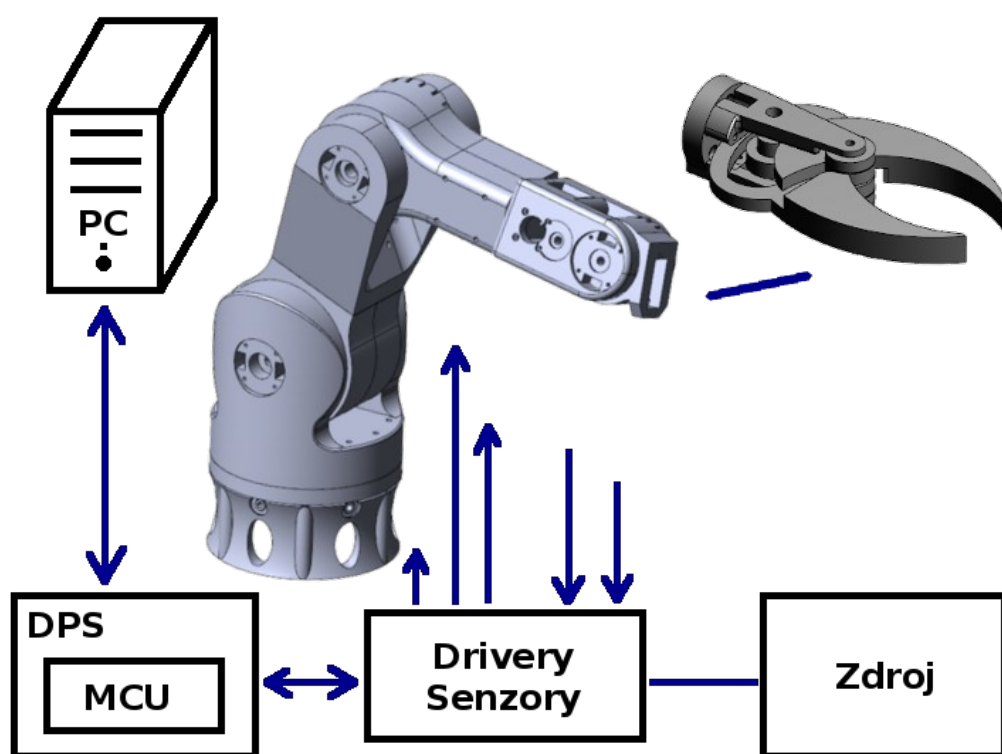
Výhodou této zpětné vazby je především přesnost a dostatečná kontrola pohybu a polohy manipulátoru s možností detekce kolize nebo poruchy pohybového ústrojí.

Kromě kontroly polohy přímo na zařízení je možné ji kontrolovat i vzdáleně a to pomocí tzv vizualizace – kontrolou kamerou nebo jiným zařízením sledující opticky manipulátor. V takovém případě je snímáno celé rameno nebo jeho část, obraz následně počítačově zpracován a vyhodnocena jeho aktuální poloha v prostoru. Výhodou je kontrola v reálném čase celého ramene a dokonce predikce kolize, pokud je na kameře zachycena možná překážka v plánované dráze manipulátoru. Navíc může být kontrolován stav manipulovaného břemene nebo přítomnost osoby v bezprostřední blízkosti pracovního prostoru.

Hlavní nevýhodou je potřeba dostatečného výpočetního výkonu pro vyhodnocení všech obrazových dat. Další nevýhodou je limitace přesnosti rozlišením kamery. Možnou nápravou je využití laserového skenování koncového bodu manipulátoru. I přes toto opatření může někdy dojít k dalšímu problému, a to zakrytí klíčové části ramene břemenem, samotným ramenem nebo jiným zařízením ve výrobě (kooperující rameno, pomocný manipulátor apod.). Proto je potřeba umístit snímače vhodně popřípadě z více pohledových úhlů.

## 5. REALIZACE MODELU ROBOTICKÉHO RAMENE

Tato část práce se zabývá vlastní realizací modelu průmyslového robotického ramene. Je rozdělena do několika podkapitol v logickém pořadí od konstrukce přes mikroprocesor řízení po software. V každé kapitole jsou zmíněna zvažované možnosti a následně zdůvodněna volba konečného řešení.



Obr. 5.1 Blokové schéma komplexního řešení modelu robotického ramene.

## 5.1 Konstrukce

Vhodná volba konstrukce robotického ramene je i v případě modelu klíčová. Náš model bude sloužit jako výuková pomůcka v laboratorních cvičení a bude mít za úkol přiblížit studentům průmyslová robotická ramena jak z hlediska konstrukce, tak i z hlediska zacházení s nimi nebo jejich programování. Z tohoto důvodu jsem zvolil robustní konstrukci se šesti stupni volnosti.



**Obr. 5.2** Fotka složeného modelu robotického ramene

Robustní konstrukce se svým řešením velice blíží robotickým manipulátorům používaným v reálných situacích v průmyslových výrobach. Tato konstrukce také umožňuje poznat různé typy pohonů a jejich přenosů na vlastní rameno. Jsou zde použity přímé náhony, převod pomocí série ozubených kol, převod rotačního pohybu pomocí hřebenového převodu a páky na pohon čelistí nebo v průmyslu velice častý pohon přes převodovku s následným rozvodem přes ozubený řemen. Robustnost konstrukce má mimo funkce naučné také funkci praktickou. Model s takto robustní konstrukcí má dostatečnou nosnost pro manipulaci s běžnými předměty o velikosti úměrné k měřítku modelu. Poslední výhodou této robustnosti je také stabilita ramene jak ve statické poloze tak i při pohybu. Méně robustní manipulátory trpí na vibrace způsobené pružností materiálu o nedostatečné pevnosti nebo přílišném oslabení. Díky tomuto jevu dochází po ukončení každého pohybu manipulátor ještě k jeho viditelným oscilacím, někdy i po dobu několika vteřin. Ke stejným oscilacím dochází i při pouhém kontaktu ruky s daným manipulátorem. V případě dostatečně robustní konstrukce ramene je však docílena taková pevnost, že případné oscilace nejsou pohledem registrovatelné.

Řešení se 6 stupni volnosti jsem zvolil také z praktického důvodu. Toto řešení je jedno z nejvíce používaných v průmyslové výrobě. Umožňuje plný pohyb ve všech třech osách prostoru (jednoznačně vymezuje v kartézském souřadném systému polohu a orientaci manipulovaného objektu). Tři stupně volnosti představují posuv ve třech osách  $x$ ,  $y$ ,  $z$  a další tři stupně volnosti umožňují i rotaci v těchto třech osách. Tím pádem se jedná o tzv. univerzálního robota. Menší počet stupňů volnosti by omezoval pohyb v kartézském souřadnicovém systému a naopak větší počet stupňů volnosti by sice umožňoval pohyb za překážkou, ale takové řešení se využívá jen ve specifických případech.

Při volbě měřítka robotického ramene jsem hleděl na praktičnost. Robot je dostatečně velký, aby se pohodlně dalo manipulovat s jeho jednotlivými díly. To také umožňuje studentům ve výuce důkladně prostudovat konstrukci a detaily náhonů a převodů. Se svou velikostí se však stále dá pohodlně umístit na stůl v laboratořích a studovat jeho pohyblivost a testovat jeho ovládání.

Kromě vlastní konstrukce bylo potřeba zvolit i vhodný materiál a technologii výroby. Na stole byly tři kombinace technologie a materiálu. První kombinací byla ocelová konstrukce vyrobena kovoobráběním (soustružení a frézování). Tato kombinace by umožňovala nejvyšší pevnost všech dílů, srovnatelnou s reálným průmyslovým řešením, a vysokou přesnost. Samotné kovoobrábění je ale také velkou nevýhodou kvůli své vysoké ceně. Využívá se velice drahého zařízení s vysokou přesností a také vysoce odolných a tím i drahých nástrojů, což výrobu prodražuje. Vliv na cenu má fakt, že kovoobrábění je metoda subtraktivní a začíná se s velkým objemem oceli. Druhým negativním faktorem je vysoká hmotnost ocelové konstrukce. V případě výukového modelu nepřevážily výhody této metody její nevýhody.

Další kombinací byla hliníková (duralová) konstrukce vyrobena metodou odlévání s následným obrobením funkčních ploch. Dural má oproti oceli nižší teplotu tání a tím je její odlévání dostupné případně i v domácích podmínkách. Výhodou je, že při odlévání je minimální odpad v podobě strusky (směs oxidů odlévaného kovu, jeho nečistot nebo celých fragmentů v případě recyklace). Další výhodou oproti oceli je i nižší tvrdost a tím obrobitelnost nebo nižší hustota a tím i nižší celková hmotnost celého robotického ramene. Nevýhodou odlévání je však opět cena, v případě průmyslového zadání, nebo technologická náročnost, v případě domácího odlévání. I přes menší obráběný objem a menší hmotnost jsou tyto faktory oproti poslední možnosti stále spíše nevýhodou.

### **5.1.1 Technologie 3D tisku**

Poslední kombinací výrobní metody a materiálu byla kombinace technologie 3D tisku a plastu. Technologie 3D tisku má v porovnání s výše zmíněnými nejnižší pevnost, pro potřeby modelu průmyslového robotického ramene jako výukové pomůcky je tato pevnost však více než dostatečná. Velkou výhodou plastu je jeho nízká hmotnost při dostatečné pevnosti, která umožňuje pohodlnou manipulaci při zachování minimální nosnosti potřebné při výuce. Další výhodou je plně aditivní metoda výroby s prakticky nulovým odpadem. V případě vývoje prototypu je technologie 3D tisku, nazývaná někdy také jako rapid prototyping, výhodná pro svou rychlost výroby a nízkou cenu. Pro snížení ceny a hmotnosti je možné také využít plnění objemu nižší jak 100%. V takovém případě je potřeba počítat s určitým snížením nosnosti.

Při použití technologie 3D tisku je důležité správné nastavení parametrů tisku a také vhodná volba použitého typu tiskového filamentu. Klíčové parametry při tisku jsou:

- Teplota trysky.
- Průměr trysky.
- Rychlost tisku.
- Procento plnění.

Teplota trysky je důležitá pro dosažení pevné struktury s přesným tvarem. V případě nízké teploty by nová vrstva nemusela dostatečně přilnout k vrstvám předchozím. Naopak vysoká teplota může způsobit deformaci předmětu (například vertikální vroubky). Správné nastavení teploty souvisí především s ostatními parametry. Pro trysky s menším průměrem postačí nižší teplota, kdežto větší trysky vyžadují vyšší teplotu, aby se větší množství materiálu procházející tryskou stihlo dostatečně prohřát. Dalším takovým parametrem je rychlost tisku (rychlost pohybu tiskové hlavy). S rychlostí tisku souvisí i rychlost pohybu filamentu do trysky. S vyšší rychlostí nastává podobný jev jako u větším průměru trysky, za daný čas je potřeba natavit větší objem materiálu.

Vhodnou konfigurací všech těchto parametrů lze dosáhnout různých výsledků. Pro vyšší přesnost se zvolí menší tryska s menší rychlostí tisku a teplota se optimalizuje spíše na nižší teploty. Pro velice rychle hotový prototyping, který nepotřebuje mít funkční přesné rozměry a povrchy je vhodný tisk s velkým průměrem trysky a vysokou rychlostí tiskové hlavy. Teplotu je poté potřeba nastavit spíše k horní hranici doporučeného teplotního rozsahu.

Dalším parametrem z výčtu je procento plnění. Slouží k dosažení rovnou několika výsledků. Vhodně nastaveným procentem plnění objemu je možné dosáhnout v první řadě uspořené materiálu a tím i finančních prostředků. Dále se dá velice dobře snížit výsledná hmotnost tisknutého předmětu. Jelikož je procento plnění nižší jak sto realizováno tiskem prostorové mříže vyplněné vzduchem, tiskové hlavě stačí projet na každé vrstvě pouze obrazec mříže, což vede i ke snížení času tisku. Jedinou nevýhodou plnění nižším jak 100% je snížená pevnost.

Posledním parametrem technologie 3D tisku je druh použitého materiálu. V dnešní době existují technologie 3D tisku i pro kovové materiály nebo beton, obě zmíněné jsou však velice nákladné. Skupina materiálů, která je běžně dostupná, jsou termoplasty. Zde je výčet některých z nich:

- ABS (Akrylonitrilbutadienstyren)
- PLA (Polylaktid – kyselina polymléčná)
- PET-G (Polyethylentereftalát-Glykol)
- PMMA (Polymethylmethakrylát - plexisklo)

Každý z těchto materiálů má odlišné vlastnosti včetně různého rozmezí teplot tisku. Zde je tabulka vlastností některých z nich<sup>[28]</sup>:

**Tabulka 5-1 Vybrané parametry některých materiálů**

	Teplota trysky	Teplota podložky	Výpary	Pevnost v ohybu [MPa]	Pevnost v tahu [MPa]
ABS	210 – 250 °C	80 – 110 °C	Silné	65	37 - 110
PLA	180 – 230 °C	20 – 60 °C	Slabé	80	110
PET-G	220 – 260 °C	60 – 90 °C	Silné	64	53

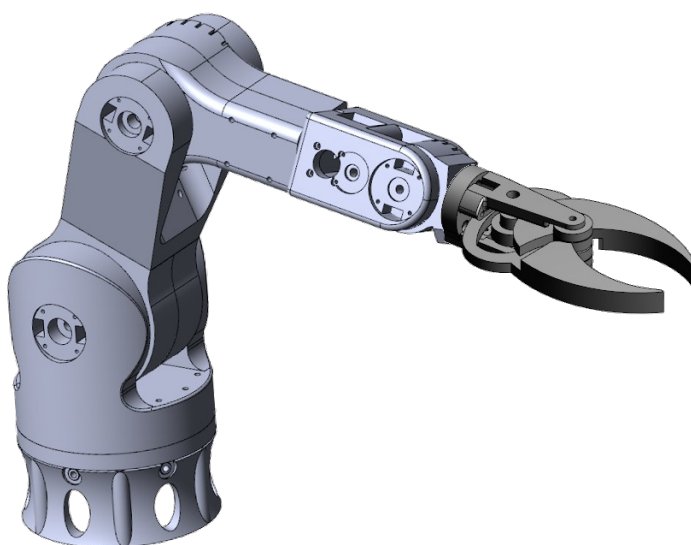
Na základě těchto vlastností jsem zvolil materiál PLA. Je to materiál plně biologicky odbouratelný. Vyrábí se z rostlinných škrobů (kukuřičný, bramborový, z cukrové třtiny). V průmyslovém tisku je stále častěji používán a patří k nejvíce používaným hned po ABS plastu. Jde o jeden z nejvíce univerzálních materiálů v 3D tisku, existuje v mnoha modifikacích díky množství příměsí<sup>[27]</sup>:

- Bamboofill – PLA s příměsí bambusových vláken (tolik se nekrouť).
- Brassfill – PLA s příměsí mosazi pro efektní kovový vzhled (kvalitnější tisk).
- Broznefill – PLA s příměsí bronzu (viz Brassfill).
- Copperfill – PLA s příměsí mědi (viz Brassfill).
- Conductive PLA – elektricky vodivý filament.

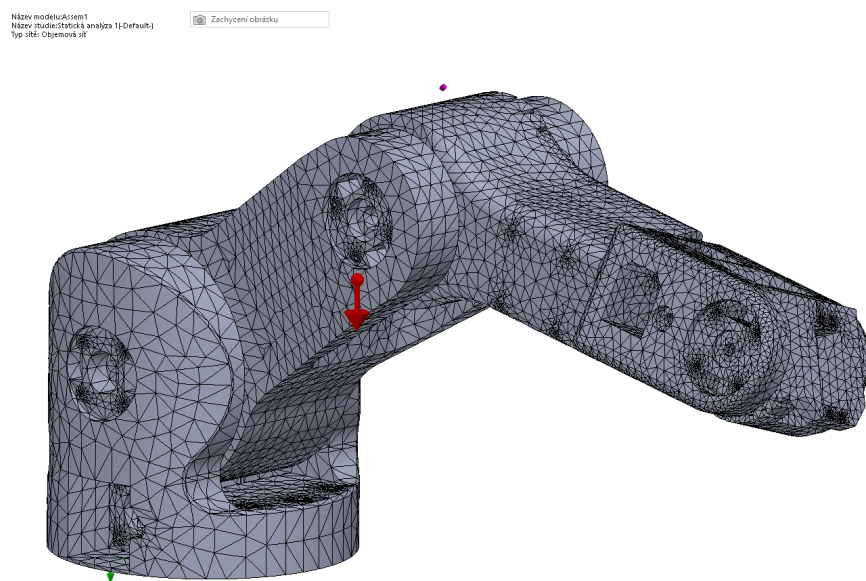


Rozsah teploty tisku čistého PLA je 180 – 230°C. Nevýhodou materiálu je pohlcování vlhkosti, proto je klíčové filaments před tiskem skladovat v suchém prostředí. Při navlhnutí filamentu se mohou během tisku objevit bublinky v materiálu. Po natisknutí nemá standardní vlhkost negativní vliv na výrobek. Výhodou PLA je jen nepatrný sklon ke kroucení. To je dáno minimální změnou objemu při tavení resp. chlazení. Další výhodou je pevnost i při nízkých teplotách tisku. A poslední výhodou, díky níž je velice oblíbený i pro domácí použití, je jeho aroma při tisku. Při tavení filamentu je cítit pouze lehce po rostlinném oleji, kdežto plasty jako ABS nebo PET při zahřátí uvolňují dráždivé aromatické uhlovodíky.

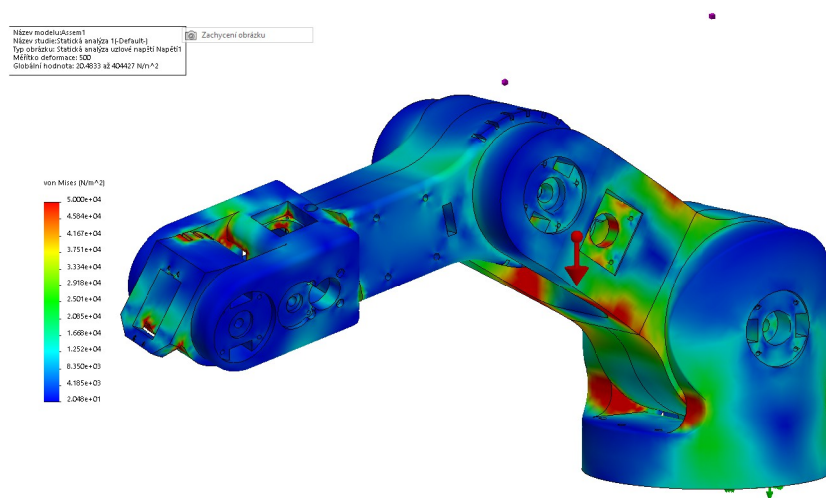
Pro další postup v realizaci nebo pro simulování kinematiky a pevnostní analýzy bylo potřeba vytvořit kybernetické 3D dvojče. Pro modelování jsem zvolil vývojové prostředí SolidWorks.



**Obr. 5.3 Kybernetické dvojče v SolidWorks**



**Obr. 5.4 Síť konečných prvků před spuštěním simulace**



**Obr. 5.5 Grafický výsledek simulace**

V simulacích jsem kromě gravitace vlastního ramene přidal na konec manipulátoru také závaží a krokoval jeho hmotnost. Výsledky statické analýzy v tabulce 5-2.

**Tabulka 5-2 Výsledky statické analýzy**

Hmotnost břemene [kg]	1	2	10
Maximální napětí [MPa]	1,19	1,97	7,86

Výsledné hodnoty nepřekračují ani pevnost v ohybu (80 MPa) ani pevnost v tahu (110 MPa). Většina dílů však byla tisknuta s plněním 30% a proto je jejich pevnost snížena. Vyjádření vztahu mezi plněním a pevností u 3D tisku se mi nepodařilo dohledat (závisí i na tvaru mříže plnění) a vlastní testy by vyžadovaly destrukci již vyrobeného modelu. Pro použití v laboratorní výuce však nebude užíváno břemen těžších jak 1 kg, jelikož rameno bude sloužit především k programování sekvencí pohybu a demonstracím, ne k přesunu těžších břemen. V tom případě je maximální napětí 1,19 MPa pouze 1,5% pevnosti v ohybu a 1,08% pevnosti v tahu a i při 30% plnění by konstrukce měla pevnost splňovat.

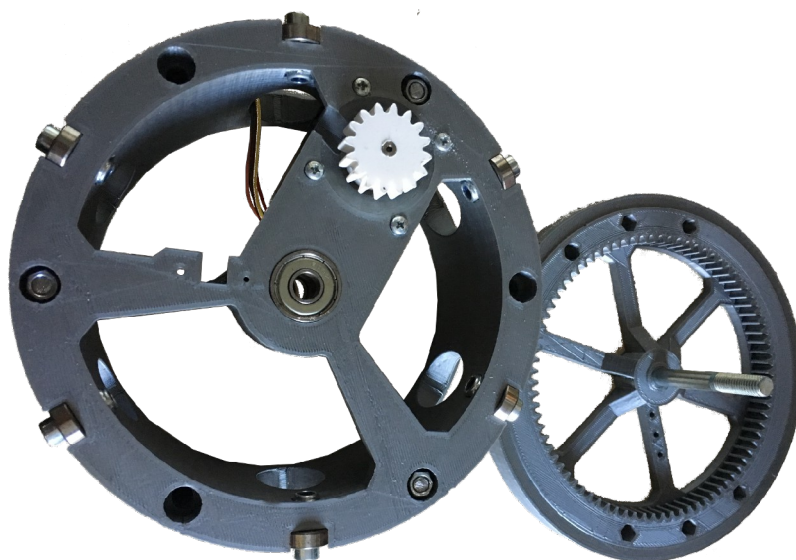
Celá konstrukce ruky je poté ještě pevně přišroubována k základní desce kvůli převrnutí. Deska má dostatečnou plochu pro poskytnutí stabilní opory a navíc jsou komponenty rozmístěny tak, aby ramenu dělaly účinné protizávaží.

## 5.2 Pohon

Pro pohon jsem jednoznačně zvolil elektrické motory. Jednak jsou jednoduché na údržbu, ale také elektřina je v dnešní době dostupná v podstatě v každé budově nebo automobilu. Navíc elektrický pohon je nejlevnější variantou, pneumatický nebo hydraulický pohon by se na tak malém modelu neoplátil.

Na modelu jsou použity různé typy elektrických motorů a převodů. Jejich volba nebyla náhodná. Obecně jsou dole, blíže základně, použity motory těžší a silnější, aby neměly problém s pohybem ramene. Pro vzdálenější klouby ramene jsem volil spíše lehčí varianty (menší převodovka nebo menší motor, optozávora místo enkodéru). Jednotlivé stupně volnosti a jejich pohony jsou řešeny v následujících odstavcích.

Prvním kloubem, konkrétně s rotací kolem osy ramene, je díl základny připevněn k základní desce. O pohon se stará krokový motor s pastorkem. Ten pohání oběžné kolo, na kterém je připevněn zbytek robotického ramene. Použitý krokový motor je unipolární zapojen jako bipolární. O přesnou polohu se stará princip přesně definovaného kroku a optozávory pro určení nulového bodu.



**Obr. 5.6 Základna s pastorkem náhonu a oběžným kolem**

První kloub s osou rotace kolmou na osu ramene je osazen DC motorem, převodovkou s velkým převodovým poměrem a s řemenem zajišťujícím další převod. Jedná se o kloub s absolutně největší zátěží. To vyplývá nejen z jednoduché úvahy, že motor musí zdvíhat většinu hmotnosti ramene včetně zbylých motorů a břemene, ale tyto úvahy potvrdila i simulace. Aby se zmenšilo zatížení motoru, je použita převodovka s velkým převodovým poměrem. A vzhledem k použití také enkodéru na daném kloubu jsem zvolil DC motor pro jeho jednoduší ovládání z mikrokontroléru. Převodovka v době otáčení zajišťuje dost jemný krok a enkodér zajišťuje kontrolu polohy. Velký převod navíc zajišťuje minimální přenos sil z páky na motor v době zastavení. Použitý motor je G42x25 s planetovou převodovkou s převodovým poměrem 156:1.

Další motor, umístěn v největším segmentu ramene, zajišťuje pohyb pro mnohem menší a lehčí část robota. Proto není použito tak velkého převodu (velká a těžká převodovka na předchozím kloubu nezatěžuje nadměrně žádný kloub). Menší převod však naopak vyžaduje přesnější krok motoru, což byl důvod zvolení krokového motoru (typ 1040220). Tento kloub opět zajišťuje pohyb zdvíhání (osa otáčení kloubu je kolmo na osu ramene).

Další kloub má osu rotace shodnou s osou ramene, tudíž se nepodílí na zdvihu a břemeno pouze otáčí. To je důvod proč nepotřebuje převody. Pro tento kloub jsem zvolil kombinaci krokového motoru a optozávory.

Následuje poslední kloub sloužící ke zdvihu, který opět využívá převodů pro zvýšení síly motoru a snížení zpětné vazby na motor od kmitů ramene. Pohon zajišťuje krokový motor a polohu sleduje magnetický enkodér.

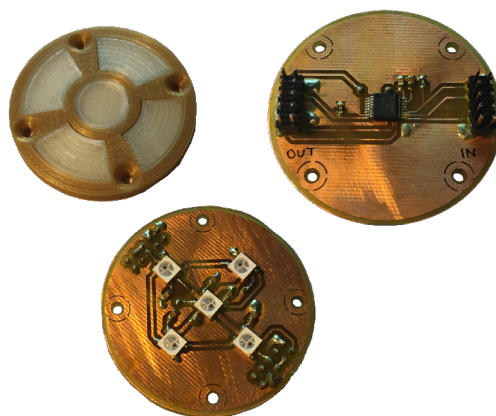
Poslední kloub sloužící k pohybu, konkrétně k rotaci okolo osy ramene, nese nejmenší možnou hmotnost, ale naopak jeho hmotnost je znát díky páce na předchozích kloubech. Proto jsem zvolil servo motor MEX-645BB MG s již integrovanou kontrolou polohy pro ušetření hmotnosti.

Ze stejného důvodu je servo MEX-645BB MG použito i na posledním kloubu čelisti. Ten zajišťuje sevření čelisti přes páku díky ozubeným kolům a hřebenu. Čelist potřebuje dostatečnou sílu pro sevření, aby udržela i těžší předměty. K udržení ji napomáhá silikonový potah vnitřní strany čelisti.

### 5.3 Enkodér

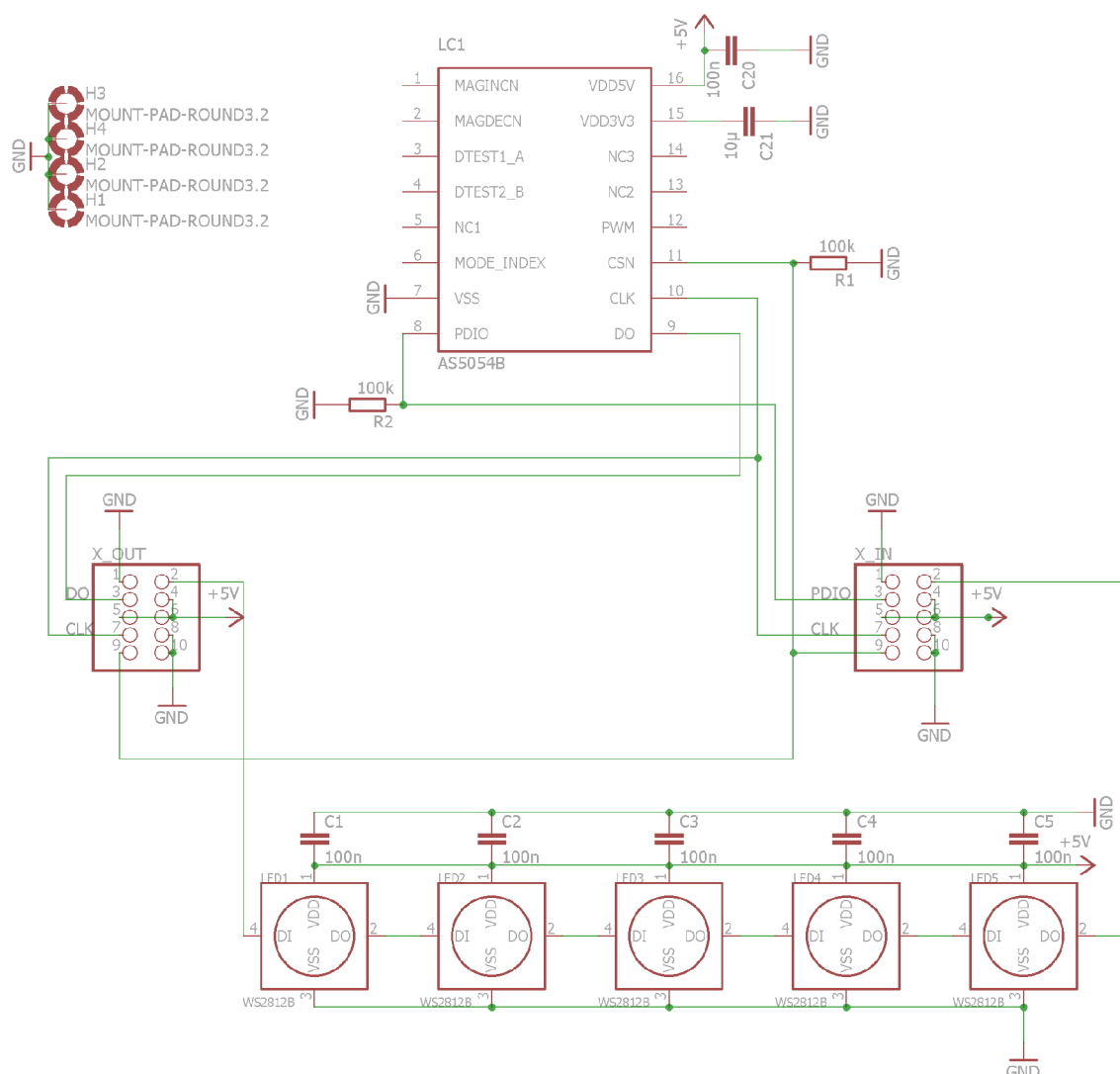
Nejzatěžovanější klouby na modelu jsou ty, které mají osu rotace horizontální. Je to způsobeno neustálým působením gravitace směrem dolů a s touto silou se musí pohon vypořádat nejen při chodu, ale v době držení statické polohy. Ve výjimečném případě může dojít k přeskočení kroku motoru a tím vznikne chyba v poloze. To je jeden z důvodů, proč jsou enkodéry, tedy snímače polohy, osazeny právě na tyto klouby.

Pro toto použití jsem vyrobil 3 desky s magnetickým enkodérem. Druhá strana desky je využita pro optickou signalizaci stavu ramene popř. konkrétního kloubu pomocí LED světelné signalizace. Desky jsou umístěny spolu s plastovým krytem na těle ramena v místě kloubu. Všechny tři desky jsou vzájemně propojeny sériovou komunikací a připojeny k řízení. Pro signalizaci je použita programovatelná LED WS2812B a jako magnetický enkodér jsem použil AS5045-ASSU v pouzdru SSOP16.



Obr. 5.7 Deska enkodéru z obou stran a její plastový kryt

Pro správnou funkci enkodéru je potřeba použít dipólového magnetu ve správné orientaci vůči čipu. Ideální orientací magnetu je, aby osou rotace magnetu byl střed mezi magnetickými póly. Další podmínkou je kolmost osy rotace na plochu čipu enkodéru a její vycentrování do středu plochy čipu. Za těchto podmínek bude enkodér podávat správné hodnoty o rotaci magnetu s dostatečnou přesností. Při stabilní teplotě 25°C nepřesahuje chyba výstupních hodnot rozsah  $\pm 0,5$  stupně.

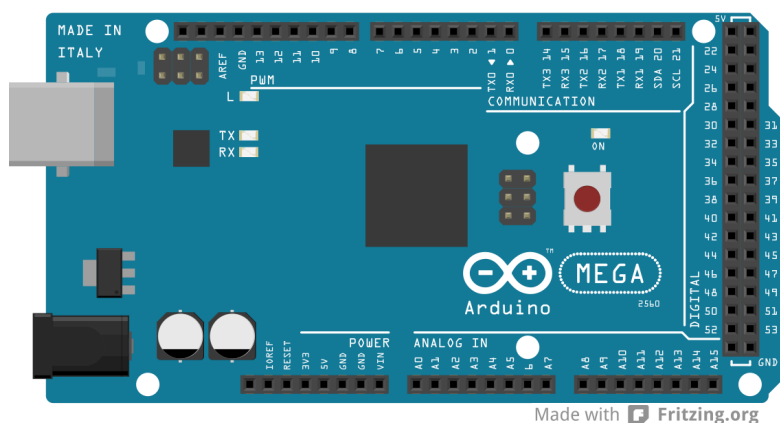


**Obr. 5.8 Elektrické schéma obvodu s magnetickým enkoderem.**

## 5.4 Hardware - Řízení

Vlastní hardware řízení se bude skládat z několika částí. Napájecí část bude společná pro řízení i pro pohon robotického ramene. Pro napájení je použit spínaný síťový zdroj s výstupním napětím 12V. Tímto napětím bude napájena deska s mikrokontrolérem a přes desku s driverem pro silové řízení budou napájeny i motory.

Jako desku řízení s MCU jsem zvolil, pro mě již osvědčené, Arduino Mega 2560. Rozměry desky jsou 53,30 mm na šířku a 101,52 mm na délku. Využívá mikrokontrolér ATmega 2560 s architekturou AVR a taktem až 16 MHz. Napájení čipu je 5 V a výrobcem doporučené napájení desky je 7 – 12 V. Arduino totiž obsahuje napěťový stabilizátor 7805T přímo na desce.<sup>[29]</sup> Při jednodušších aplikacích je výhodné napájet desku přímo přes konektor USB. V našem případě však bude odběr pohonu velký a vyžaduje samostatný zdroj, kterého se využije i pro desku Arduino.



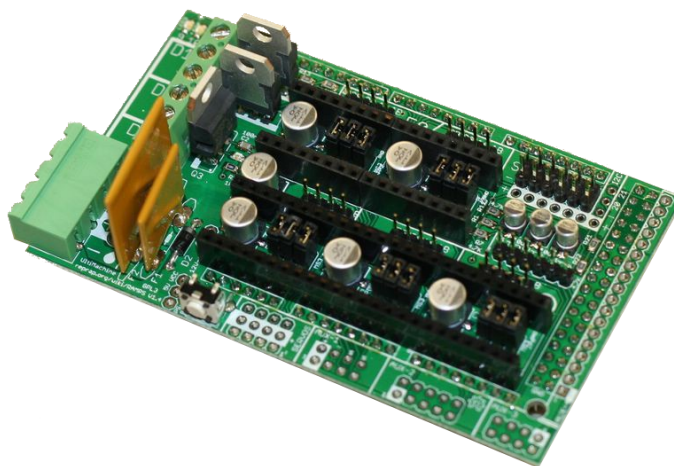
Obr. 5.9 Deska Arduino Mega 2560<sup>[30]</sup>

Na desce Arduina Mega 2560 je použitelných 54 digitálních vstupů/výstupů, z nichž 15 umožňuje režim PWM. Dále je možné použít 16 analogových vstupů. Každý digitální pin může poskytovat 20 mA stejnosměrného proudu a v případě pinů 3,3 V je to 50 mA. Hodinový signál pro MCU zajišťuje přímo na desce 16 MHz krystalový oscilátor. Dále poskytuje různé typy paměti pro uchování dat:

- EEPROM – 4KB
- SRAM – 8KB
- Flash – 256KB

Flash paměť však není celá dostupná, 8KB je využito pro uložení zavaděče. Arduino obsahuje také řadič pro komunikaci přes USB s počítačem. Dále je možné pomocí firmware nakonfigurovat sériovou komunikaci přes I<sup>2</sup>C.<sup>[29]</sup>

Arduino umožňuje připojení tzv. shieldů na pinové lišty po jeho obvodu. V některých případech je dokonce možné navrstvit více shieldů na sebe. Ne všechny však tuto možnost nabízejí. Pro toto řešení jsem zvolil shield navržený pro ovládání krokových motorů pro 3D tisk, RAMPS verzi 1.4. Tento obvod je však pro svou univerzálnost s oblibou využíván i pro jiné aplikace.



**Obr. 5.10 Deska shieldu RAMPS 1.4<sup>[31]</sup>**

Deska obsahuje pět pozic pro vložení řadičů krokových motorů A4988, A4983 nebo DRV8825 včetně kolíkových vývodů pro zapojení kabeláže a jumperů pro konfiguraci jemnosti kroku motoru. Na shieldu jsou také kolíky pro připojení koncových optozávor, které se pro řízení krokových motorů mohou využít.<sup>[32]</sup>



60

## 5.5 Firmware - MCU

Pro psaní firmware pro mikrokontrolér využívám prostředí Arduino IDE a programovací jazyk C modifikovaný pro toto prostředí. Vlastní firmware by se dal rozdělit na několik hlavní částí.

První část, z hlediska komunikace, je komunikace přes USB. To je sice při připojení využito fyzicky, ale virtuálně se mikrokontrolér připojuje na sériový port. Je to dáno vlastností Arduina, které pro komunikaci s vývojovým prostředím Arduino IDE používá, mimo programování, také pouze virtuální sériový port. USB je používáno jen pro nahrávání firmwaru mikrokontroléru a o tuto operaci se stará čip ATmega 16U2, který není vlastnímu mikrokontroléru dostupný. Arduino se k počítači připojí jako zařízení Plug and Play a bude čekat na další instrukce. Těmi je přepis firmware přes USB a nebo připojení jako zařízení na sériovém portu. Režii USB komunikace provádí automaticky systémové ovladače na pozadí. O režii komunikace sériového portu se stará aplikace s vývojovým prostředím. Komunikace probíhá dvousměrně přes signály Rx (příjem) a Tx (odeslání). Obě zařízení komunikace (mikrokontrolér i počítač) čekají na pozadí na příjem dat a provádí jiné své operace. Při příjmu dat do svého přijímacího zásobníku tuto událost zaznamenají, dokončí aktuální činnost a poté data vyčtou a dále vyhodnotí, uloží nebo provedou.<sup>[33]</sup>

Toto komunikační rozhraní jsem již vytvářel při své bakalářské práci a poté jsem ho dále ladil a vylepšoval. Důležitou částí komunikace je její navázání. Firmware pro ovládání (konkrétně část pro komunikaci) má v sobě uložený unikátní otisk pro identifikaci. Protokol sériové komunikace totiž nemá takové možnosti pro identifikaci zařízení jako protokol USB a proto je nutné se zařízení vždy při navazování komunikace dotázat, zda je to to správné zařízení. Počítačová aplikace pošle dotaz, je-li dotaz ve správném tvaru, MCU odpoví svou vlastní identifikací. Pokud aplikace tuto identifikaci rozpozná, uloží si do paměti dočasně informaci o tom, že na daném portu se nachází deska řízení robotického ramene.

Další částí je ovládání vlastního modelu robotického ramene. Pro to existuje více režimů. Online režim umožňuje přes počítačové rozhraní v reálném čase ovládat rameno. Program po přepnutí do režimu online v podstatě čeká na příkaz ze sériové komunikace. Obsahuje-li příkaz informaci o nové poloze, program přejde do procedury pohybu a začne pohyb, s ohledem na zpětnou vazbu, provádět. Po dokončení pohybu nebo po příkazu pro nouzové zastavení program z procedury vystoupí a čeká na další instrukce.

Druhou funkcí je v podstatě automatický režim. V tom program obdrží dlouhou sérii instrukcí s informacemi o poloze. Tu si částečně zpracuje nebo přímo uloží do paměti na desce. Následně čeká na příkaz. V případě příchozího příkazu „Spustit sekvenci“ přejde program do procedury přehrávání uložené sekvence. V pravidelných intervalech stále kontroluje, zda nepřišel příkaz pro zastavení, ale ostatní příkazy ignoruje. Neustále čte uložené příkazy ze sekvence v paměti a postupně je provádí. Pro kontrolu stavu ramene uživatelem nebo i případné vyhodnocení správnosti zadané sekvence posílá program i v automatickém režimu informace o aktuální poloze ramene, započatých nebo ukončených operacích programu apod.

Další menší, ale přesto velmi důležitá funkce je inicializace popř. kalibrace nulových poloh kloubů ramena. I když jsou 3 klouby opatřeny magnetickým enkodérem a 2 klouby servem s definovanou absolutní polohou, stále jsou tu dva klouby s přesným krokem, avšak pouze optozávorou jako zpětnou vazbou. Rotace klouby při vypnutém napájení způsobí v podstatě ztrátu informace o reálné poloze. Právě funkce inicializace a rekalkulace umožňuje tuto nulovou polohu znovu nalézt s minimálním rizikem kolize.

## 5.6 Software – PC rozhraní

Aplikace počítačového uživatelského rozhraní Robot Control App 2.0 je realizována ve vývojovém rozhraní MS Visual Studio 2010. Projekt je psán v programovacím jazyce C++ se zvolenou formulářovou aplikací CLR využívající .NET4 Framework. Z funkčního hlediska má aplikace několik částí:

- komunikace s deskou řízení přes USB (virtuální serial),
- online řízení robotického ramene nebo konfigurace řízení,
- převod mezi různými formáty polohy ramene,
- programování pohybu robota s možností uložení kódu.

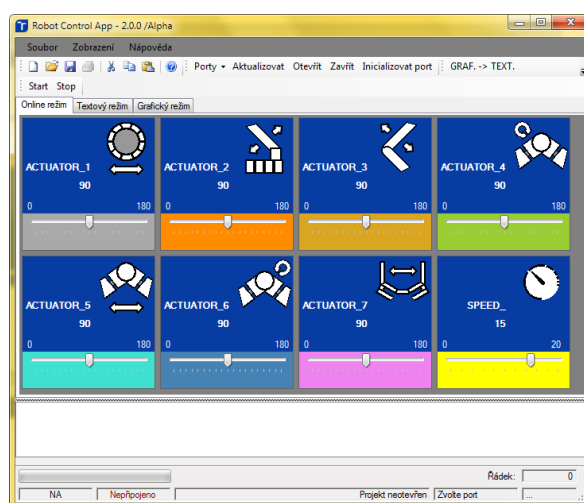
Tyto funkční části je možné částečně rozlišit i v grafické podobě programu. V nástrojových lištách jsou především nástroje pro připojení a komunikaci s deskou řízení. Při pohybu mezi jednotlivými panely pak přecházíme mezi online režimem ovládání ramene a programováním pohybu pro automatický chod robota.

Aplikace mimo spustitelného .exe souboru využívá také adresář AppData a soubory v něm umístěné. Jedná se především o některé obrázky grafického rozhraní, které nebylo možné implementovat přímo do .exe souboru nebo soubory s konfigurací apod.

Komunikace s vlastní deskou řízení probíhá pomocí obousměrnému provozu. Aplikace posílá příkazy, jimiž ovládá řízení a řízení naopak posílá informativní zprávy, které aplikace využívá pro nastavení nebo zobrazení pro informování uživatele. Komunikaci je navíc potřeba také řídit a správně nakonfigurovat. Jedním z důležitých signálů je DTR (*DtrEnable*) – Data Terminal Ready. Jeho defaultním zakázáním se zabrání resetování Arduina při připojení kabelu. To je praktické především proto, že mikrokontrolér bude ovládat mechanické prvky a jejich nekontrolovaný pohyb během resetu by mohl způsobit kolizi a poškození. Dále je potřeba hlídat, aby k portu přistupovala vždy jen jedna komponenta aplikace.<sup>[33]</sup>

Další funkcí aplikace je kontrola a následná kompilace kódu pro ovládání ramene. Ta zkontroluje kód a zobrazí výpis možných chyb i s nápovědou, která by uživateli mohla být nápomocná. Kontrolu je možné provádět i samostatně a nezatěžuje tolik počítač. Při kompilaci na programovací řetězec probíhá vždy nejdříve kontrola. Chybný kód by totiž mohl způsobit problémy při překladu a tato chyba by se mohla dostat až do řízení a následného pohybu ramene. Výsledný řetězec je po validní kontrole nakonec poslán do řízení a uložen do EEPROM. Spuštění i zastavení je možné provést přes aplikaci.

Dalším a velmi výrazným rysem je design aplikace. Snahou bylo hlavně přehledné, srozumitelné ale přesto líbivé uživatelské rozhraní. Uživatel je nejdříve uvítán informačním oknem, jehož prostřednictvím se dozví o účelu aplikace. Následně se mu zobrazí hlavní pracovní okno s online režimem. Veškeré nástroje jsou přehledně poskládané na horní liště. Aplikace je koncipována tak, aby uživatele přirozeně naváděla. Například postup připojení je krásně vidět na panelu zleva doprava jako u čtení textu: Aktualizovat → Otevřít → Zavřít. Vedle online režimu aplikace nabízí programovací režim a s omezenými možnostmi také grafický režim.



**Obr. 5.12 Ukázka hlavního okna aplikace**

## 6. ZÁVĚR

Práce seznamuje s pojmy automatizace nebo Průmysl 4.0. Blíže popisuje klíčové prvky Kyberneticko-fyzických systému (CPS), Internetu věcí (IoT) nebo požadavky na výpočetní výkon, které hrají v konceptu Průmysl 4.0 svou významnou roli. V práci jsou detailně popsány průmyslové robotické manipulátory. Hodně prostoru je věnováno také jejich definici, dělení nebo využití. Do hloubky se věnuje problematice konstrukcí, pohonů (všem třem základním typům) a ovládání robotických ramen. Pod ovládání patří také velice významnou měrou typy zpětné vazby, využívané pro kontrolu přesné polohy. Dále seznamuje s pojmem inverzní kinematiky a s jejím praktickým využitím. Velký prostor je věnován vlastní realizaci modelu průmyslového robotického ramene. Díky informacím o manipulátorech v teoretické části jsou vysvětleny jednotlivá rozhodnutí při realizaci modelu. Dále je v části realizace probrána metoda výroby pomocí 3D tisku (též Rapid prototyping) nebo prakticky ukázáno využití kybernetického dvojčete modelu v simulacích. Kapitulu realizace uzavírá tvorba a popis firmwaru a softwaru pro ovládání ramene. Je zde popsán jak propojení mezi firmwarem na desce a uživatelským rozhraním na počítači, tak i program a aplikace zvlášť.

V rámci realizace bylo využito počítačového modelování. Model byl na základě výsledků ze simulací topograficky optimalizován. V okamžik dosažení uspokojujících výsledků v simulacích se přešlo k vlastní výrobě metodou 3D tisku. Výsledkem je kompletní konstrukce modelu robotického manipulátoru z PLA plastu. Následně byl robot osazen elektromotory. Simultánně s tiskem probíhala výroba desek pro magnetické enkodéry. Následně jim byly natisknuty kryty a byly osazeny na robotické rameno. Následovala fáze programování, na jejíž konci vznikl firmware pro řízení a aplikace s uživatelským rozhraním na počítače.

Vytvořený model včetně řízení a softwaru bude následně sloužit jako výuková pomůcka pro rozvíjení praktických schopností studentů. Samotný model je možné také rozvíjet, například o pokročilou průmyslovou vizualizaci nebo optickou kontrolu pracovního prostoru. Další možností je namontování 3D skeneru nebo jiných nástrojů.

## Literatura

- [1] Automatizace - Slovník [cit. 2018-03-25]. Dostupné z WWW:  
<http://slovník-cizích-slov.abz.cz/web.php/slovo/automatizace>
- [2] Automatizace [cit. 2018-02-26]. Dostupné z WWW:  
<https://cs.wikipedia.org/wiki/Automatizace>
- [3] Přejato z WWW:  
<https://media.novinky.cz/076/540761-gallery1-t047r.jpg>
- [4] Průmysl 4.0 [cit. 2018-03-26]. Dostupné z WWW:  
[https://cs.wikipedia.org/wiki/Pr%C5%AFmysl\\_4.0](https://cs.wikipedia.org/wiki/Pr%C5%AFmysl_4.0)
- [5] Přejato z WWW:  
[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7a/Industry\\_4.0\\_%28cs%29.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7a/Industry_4.0_%28cs%29.png)
- [6] Kyberfyzikální systémy [cit. 2018-03-28]. Dostupné z WWW:  
<https://www.iot-portal.cz/2016/08/22/kyberfyzikalni-systemy/>
- [7] Cyber-physical system [cit. 2018-04-01]. Dostupné z WWW:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Cyber-physical\\_system](https://en.wikipedia.org/wiki/Cyber-physical_system)
- [8] Přejato z WWW:  
[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/f/fb/CPS\\_for\\_Manufacturing.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/f/fb/CPS_for_Manufacturing.png)
- [9] Upraveno z WWW:  
<http://cf525.uf.tistory.com/image/214BE94058CF0D7F3893EE>
- [10] Internet věcí [cit. 2018-05-02]. Dostupné z WWW:  
[https://cs.wikipedia.org/wiki/Internet\\_v%C4%9Bc%C3%AD](https://cs.wikipedia.org/wiki/Internet_v%C4%9Bc%C3%AD)
- [11] ARKIN, Ronald C. *Behavior-based robotics*. Cambridge, Mass.: MIT Press, c1998. ISBN 0-262-01165-4.
- [12] SKAŘUPA, J. *Průmyslové roboty a manipulátory*. Elektronické skriptum. Ostrava: Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2007. 260 s.
- [13] Upraveno z WWW:  
<https://www.kuka.com/-/media/kuka-corporate/images/products/robots/industriroboter.jpg>
- [14] Přejato z WWW:  
<http://robotics.naist.jp/wiki/?plugin=ref&page=%E7%A0%94%E7%A9%B6%E8%A8%AD%E5%82%99%2FKUKA&src=LBRiiwa.png>
- [15] Přejato z WWW:  
[http://img.directindustry.com/images\\_di/photo-g/30265-7087535.jpg](http://img.directindustry.com/images_di/photo-g/30265-7087535.jpg)
- [16] Přejato z WWW:  
[http://www.allonrobots.com/images/cartesian\\_epson.jpg](http://www.allonrobots.com/images/cartesian_epson.jpg)

- [17] Převzato z WWW:  
[http://i1-linux.softpedia-static.com/screenshots/SCARA-robot\\_1.jpg](http://i1-linux.softpedia-static.com/screenshots/SCARA-robot_1.jpg)
- [18] Převzato z WWW:  
<https://technicspratt.files.wordpress.com/2009/09/self-assembly.jpg>
- [19] BÍLEK, J. *Model a řízení robotického ramene*. Bakalářská práce, Brno, FIT VUT v Brně, 2013. 37 s.
- [20] MANSEUR, Rachid. *Robot modeling and kinematics*. Boston, Mass.: Da Vinci Engineering Press, c2006. ISBN 978-1584508519.
- [21] Upraveno z WWW:  
<http://slideplayer.cz/slide/3113989/11/images/4/Konstrukce+a+zna%C4%8Den%C3%AD+jedno%C4%8Dinn%C3%A9ho+v%C3%A1lce.jpg>
- [22] Převzato z WWW:  
[https://media.rs-online.com/t\\_large/F1215291-01.jpg](https://media.rs-online.com/t_large/F1215291-01.jpg)
- [23] Převzato z WWW:  
[https://www.festo.com/rep/cs\\_cz/assets/VUVG\\_14047u\\_710px.jpg](https://www.festo.com/rep/cs_cz/assets/VUVG_14047u_710px.jpg)
- [24] Převzato z WWW:  
[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/78/Zub\\_cerp\\_fazel.PNG/G/220px-Zub\\_cerp\\_fazel.PNG](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/78/Zub_cerp_fazel.PNG/G/220px-Zub_cerp_fazel.PNG)
- [25] ROUBÍČEK, Ota. *Elektrické motory a pohony: příručka techniky, volby a užití vybraných druhů*. Praha: BEN - technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-092-x.
- [26] SKAŘUPA, J. *Teorie průmyslových robotů*. Vydání I. Košice: Edícia vedeckej a odbornej literatúry – Strojnícká fakulta TU v Košiciach, Vienaľa Košice, 2000. ISBN 80-88922-35-6, 260 s.
- [27] Materiál pro 3D tisk - Slovník [cit. 2018-05-10]. Dostupné z WWW:  
<https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/>
- [28] Rozdíly mezi materiály 3D tisku [cit. 2018-05-11]. Dostupné z WWW:  
<https://www.materialpro3d.cz/blog/rozdiely-abs-pla-petg/>
- [29] Arduino Mega 2560 Rev 3 [cit. 2018-04-17]. Dostupné z WWW:  
<https://store.arduino.cc/arduino-mega-2560-rev3>
- [30] Převzato z WWW:  
[https://ardubasic.files.wordpress.com/2014/04/arduino\\_mega\\_rev\\_3\\_bb.png](https://ardubasic.files.wordpress.com/2014/04/arduino_mega_rev_3_bb.png)
- [31] Upraveno z WWW:  
[http://reprap.org/mediawiki/images/thumb/8/8c/RAMPS1-3\\_fin.JPG/800px-RAMPS1-3\\_fin.JPG](http://reprap.org/mediawiki/images/thumb/8/8c/RAMPS1-3_fin.JPG/800px-RAMPS1-3_fin.JPG)
- [32] RAMPS 1.4 [cit. 2018-04-21]. Dostupné z WWW:  
[http://reprap.org/wiki/RAMPS\\_1.4#Stepper\\_Driver\\_Boards](http://reprap.org/wiki/RAMPS_1.4#Stepper_Driver_Boards)
- [33] SOBOTA, D. *Návrh řízení a konstrukce robotické ruky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 33 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Vyroubal, Ph.D..